



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
AMBIENTAL**

LORENA GREGÓRIO PUPPIM

**MODELAGEM DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS
SUSPENSOS DE ORIGEM FLUVIAL EM UM ESTUÁRIO COM
PRESENÇA DE MANGUE**

**VTÓRIA, ES
2016**

LORENA GREGÓRIO PUPPIM

**MODELAGEM DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS
SUSPENSOS DE ORIGEM FLUVIAL EM UM ESTUÁRIO COM
PRESENÇA DE MANGUE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental, na área de concentração de Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Rigo.

VITÓRIA, ES

2016

P984m Puppim, Lorena Gregório, 1990-
Modelagem do transporte de sedimentos suspensos de
origem fluvial em um estuário com presença de mangue / Lorena
Gregório Puppim. – 2016.
95f. : il.

Orientador: Daniel Rigo.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) –
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Hidrodinâmica. 2. Estuários. 3. Transporte de sedimentos.
4. Sedimentação e depósitos. 5. Santa Maria da Vitória, Rio (ES).
6. Modelagem computacional. 7. SisBaHiA (Programa de
computador). I. Rigo, Daniel. II. Universidade Federal do Espírito
Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 628

MODELAGEM DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS SUSPENSOS DE ORIGEM FLUVIAL EM UM ESTUÁRIO COM PRESENÇA DE MANGUE

LORENA GREGÓRIO PUPPIM

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental, na área de concentração de Recursos Hídricos.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Daniel Rigo
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Julio Tomás Aquije Chacaltana
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador Interno

Alex Cardoso Bastos
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador Externo

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Daniel Rigo pela oportunidade e apoio em todos os momentos.

Ao corpo docente da pós-graduação da Engenharia Ambiental/UFES, em especial ao Júlio Chacaltana, Antônio Sérgio e José Antônio Tosta por todo conhecimento transmitido e por todo o incentivo.

Aos amigos do GEARH, em especial ao Alisson, Mônica, Gabriel e Jordano, pelo apoio e ajuda.

Ao MSc. Christian Pedruzzi por toda ajuda e conhecimento transmitido para a realização desse trabalho.

Às minhas companheiras de mestrado (Fernanda Caliman e Camila Fonseca) pelo companheirismo e apoio nos momentos difíceis.

A todos os amigos da pós-graduação, em especial, Larissa Marques, Kaio Calmon, Franciane Entringer, Selena Lopes, Núbia Laís e Anna Paula Lage.

As gatinhas do 601 (Juliete Azeredo e Daniele Guimarães) e aos agregados Bárbara Miranda, Jéssica Pedroni e Guilherme Pinheiro por todos esses anos de amizade, momentos de descontração e apoio.

Aos meus queridos avôs (Josete e Hélio), a minha mãe Larissa, minha tia Lara, meu sobrinho Lorenzo, meu amigo Carlinhos, Mariana e ao Renato por todo amor, companheirismo e paciência.

Ao CNPQ pelo financiamento da bolsa de mestrado.

A todos o meu muito obrigada, vocês com certeza fizeram essa jordana ser mais leve e especial.

“Sei que o meu trabalho é uma gota no oceano, mas sem ela, o oceano seria menor”.

Madre Teresa de Calcutá

RESUMO

A análise do transporte de sedimentos suspensos em estuários pode auxiliar no gerenciamento da bacia, bem como servir de apoio a estudos de monitoramento de compostos carregados adsorvidos a esses sedimentos. O estuário do Rio Santa Maria da Vitória compõe parte de um complexo sistema estuarino localizado na região central do estado do Espírito Santo, apresentando o Rio Santa Maria da Vitória como o principal aporte fluvial para o sistema. O ambiente é caracterizado por apresentar extensivas planícies de maré circundando o estuário e por ser um ambiente dominado por micromarés. Possíveis influências das áreas alagáveis no escoamento e no transporte dos sedimentos suspensos ao longo do sistema estuário são investigadas utilizando o modelo computacional SisBaHia[®]. O modelo computacional reproduziu de forma satisfatória os dados de elevação da superfície da água e razoavelmente os dados de corrente. As planícies de maré apresentaram menores valores de magnitude da velocidade, quando comparada as velocidades do canal adjacente, indiciam essas regiões alagáveis a serem de acumulação. A avaliação do transporte de sedimentos suspensos ao longo do estuário em diferentes regimes fluviais (período de cheia e estiagem) comprovou a influência das planícies de maré na retenção dos sedimentos suspensos transportados pelo Rio Santa Maria da Vitória, principalmente no período de estiagem, onde a menor competência fluvial dificulta o carregamento desse material. Além disso, o presente estudo confirmou que a cabeceira da Baía de Vitória é dominada por sedimentos de origem fluvial e que a presença das planícies de maré influencia de forma significativa na geomorfologia do sistema.

Palavras-chave: planícies de maré, regimes fluviais, transporte de sedimentos suspensos, zona de sedimentação, modelagem computacional, SisBaHia[®].

ABSTRACT

The transport analysis of suspended sediment in estuaries can help in the management of the basin, as well as provide support to monitoring studies carted compounds adsorbed to these sediments. The estuary of the river Santa Maria da Vitoria make up part of a complex estuarine system located in the central region of the state of Espírito Santo, with the river Santa Maria da Vitoria as the main fluvial contribution to the system. The environment is to exhibit extensive tidal flats surrounding the estuary and to be an environment dominated by low tide. Possible influence of floodplains in the flow and the transport of suspended sediments along the estuary system are investigated using the computational model SisBaHia®. The computational model reproduces satisfactorily the elevation data of the surface of the water and middling the data current. The tidal flats had lower velocity magnitude values, compared adjacent channel speeds, indicate these flooded areas to be accumulation. The assessment of transport suspended sediments along the estuary in different river systems (Period of flood and drought) shows the influence of tidal flats in the retention of suspended sediments transported by the river Santa Maria da Vitoria, mainly the period of drought, where the lower competence fluvial difficult transport of this material. Moreover, this study confirms that the upriver of Victoria Bay is dominated by sediments of source fluvial and that the presence of tidal flats significantly the geomorphology of the system.

Keywords: tidal flats, river systems, transport of suspended sediment, sedimentation zone, computational modeling, SisBaHia®.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Forçantes atuantes em um estuário.	18
Figura 2: Perfil teórico de uma planície de maré.	20
Figura 3: Níveis d'água em um canal de maré e na floresta do manguezal durante a enchente e a vazante	21
Figura 4: Modelo de distribuição de fácies estuarina em função da energia hidrodinâmica.	23
Figura 5: Definição dos termos das equações da quantidade de movimento utilizando a direção x como exemplo dos significados dos termos nas equações (3) e (4).	32
Figura 6: Esquema dos métodos de alagamento e secamento. A parte cinza representa o terreno.	36
Figura 7: Fluxograma metodológico.	41
Figura 8: Localização da área de estudo.	43
Figura 9: Mapa base contemplando o contorno da região modelada. Na figura observa-se a consideração no contorno das planícies de maré presentes na região estudada.	45
Figura 10: Malha numérica de elementos finitos utilizada na modelagem da região. A Figura a direita mostra a intensificação dos elementos biquadráticos na região do manguezal e canais adjacentes.	46
Figura 11: Batimetria das planícies de maré e isolinhas de profundidades nas regiões submersas referidos ao nível médio do mar (NMM). Valores negativos (acima do NMM) e valores positivos (abaixo do NMM),	48
Figura 12: Registro de maré astronômica construídas a partir das constantes harmônicas extraídas dos dados de elevação da superfície de água da Estação Tubarão para 17/08/2006 a 23/08/2006.	50
Figura 13: Correlação entre vazão e concentração de sedimentos suspensos total para o Rio Santa Maria da Vitória dos dados provenientes da estação Jusante Suíça entre o período de setembro a dezembro de 2012, janeiro a março de 2013 e maio a agosto de 2015.	51
Figura 14: Valores de vazão para o período de alta vazão (cheia) - fevereiro de 2013.	52

Figura 15: Valores de vazão para o período de baixa vazão (estiagem) - agosto de 2015.	52
Figura 16: Mapa de correlação entre áreas de contribuições para estimativa da vazão no ponto de controle.	55
Figura 17: Mapa de localização das estações monitoradas.	57
Figura 18: Valores sugeridos para a amplitude efetiva da rugosidade do fundo, ϵ , sem efeitos de ondas, para uso no módulo 2 DH do modelo FIST3D.	58
Figura 19: Localização das fontes de lançamentos pontuais do Rio Santa Maria da Vitória ao longo da Baía de Vitória. O símbolo em vermelho representa a localização da primeira fonte, enquanto os símbolos em preto e azul para a segunda fonte representam despejos, respectivamente, de 2/3 da concentração do sedimento suspenso e 1/3 da concentração do sedimento suspenso.	63
Figura 20: Comparação entre os dados de elevação da superfície da água medidos e simulados na estação Tubarão para o período de 27/08/2002 a 06/09/2002.	68
Figura 21: Comparação entre os dados de elevação da superfície da água medidos e simulados na estação Santo Antônio para o período de 27/08/2002 a 06/09/2002.	68
Figura 22: Comparação entre os dados de elevação da superfície da água medidos e simulados na estação Caieiras para o período de 27/08/2002 a 06/09/2002.	69
Figura 23: Comparação entre os dados de elevação da superfície da água medidos e simulados na estação Maria Ortiz para o período de 27/08/2002 a 06/09/2002.	69
Figura 24: Campo vetorial da velocidade residual para o período de 27/08/2002 a 06/09/2002.	71
Figura 25: Isolinhas da magnitude da velocidade da corrente residual para o período de 27/08/2002 a 06/09/2002.	72
Figura 26: Comparação entre os dados de magnitude de corrente medidos e simulados na estação Santo Antônio.	73
Figura 27: Comparação entre os dados de magnitude da corrente medidos e simulados na estação Maria Ortiz.	74

Figura 28: Localização dos pontos analisados. O símbolo em preto representa o ponto localizado no mangue e o símbolo em vermelho o ponto localizado no canal.....	75
Figura 29: Comparação da magnitude da velocidade para o período de sizígia em dois pontos adjacentes, estando um ponto localizado no canal e o outro no mangue.	76
Figura 30: Distribuição da massa sedimentada para a classe silte ao longo de todo o período de cheia simulado (fevereiro de 2013) para a fonte 1.	79
Figura 31: Distribuição da massa sedimentada para a classe silte ao longo de todo o período de cheia simulado (fevereiro de 2013) para a fonte 2.	79
Figura 32: Distribuição da massa sedimentada para a classe areia muito fina ao longo de todo o período de cheia simulado (fevereiro de 2013) para a fonte 1.	80
Figura 33: Distribuição da massa sedimentada para a classe areia muito fina ao longo de todo o período de cheia simulado (fevereiro de 2013) para a fonte 2.	80
Figura 34: Distribuição da massa sedimentada para a classe silte ao longo de todo o período de estiagem simulado (agosto de 2015) para a fonte 1.	82
Figura 35: Distribuição da massa sedimentada para a classe silte ao longo de todo o período de estiagem simulado (agosto de 2015) para a fonte 2.	82
Figura 36: Distribuição da massa sedimentada para a classe areia ao longo de todo o período de estiagem simulado (agosto de 2015) para a fonte 1.	83
Figura 37: Distribuição da massa sedimentada para a classe areia muito fina ao longo de todo o período estiagem simulado (agosto de 2015) para a fonte 2..	83
Figura 38: Mapa geral dos processos sedimentares apresentados ao longo da Baía de Vitória/ES.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Constantes harmônicas extraídas do registro de elevação da superfície da água da estação Tubarão para o período de 17 de agosto de 2006 a 01 de junho de 2007.....	49
Tabela 2: Dados de concentração de sedimentos suspensos para o período de cheia – fevereiro de 2013.....	53
Tabela 3: Dados de concentração de sedimentos suspensos para o período de estiagem – agosto de 2015.	54
Tabela 4: Faixa de valores recomendados para os parâmetros ao processo de alagamento e secamento.	59
Tabela 5: Qualidade dos resultados simulados com base no índice RMAE para as velocidades.....	60
Tabela 6: Análise granulométrica da estação Jusante Suíça.	64
Tabela 7: Classificação dos sedimentos segundo a granulometria.....	66
Tabela 8: Erro médio da elevação da superfície da água para as estações monitoradas.....	70
Tabela 9: Erro médio da magnitude da velocidade para as estações monitoradas.....	74

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	OBJETIVOS.....	17
2.1	GERAL	17
2.2	ESPECÍFICOS	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	PROCESSOS ESTUARINOS	18
3.2	HIDRODINÂMICA EM REGIÕES DE PLANÍCIES DE MARÉ.....	19
3.3	TRANSPORTE DE SEDIMENTO EM ESTUÁRIO	22
3.4	RELAÇÃO VAZÃO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS SUSPENSOS 24	
3.5	DISTRIBUIÇÃO DE SEDIMENTOS SUSPENSOS ASSOCIADO AO REGIME FLUVIAL EM ESTUÁRIOS COM PRESENÇA DE PLANÍCIES DE MARÉ.....	25
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	28
4.1	MODELAGEM COMPUTACIONAL.....	28
4.2	ESCOLHA DO MODELO	28
4.3	O SISBAHIA®	28
4.4	MODELAGEM HIDRODINÂMICA	29
4.4.1	Equações Governantes do Modelo Hidrodinâmico 2DH.....	30
4.4.2	Equações da Continuidade do Volume – 2DH.....	30
4.4.3	Equações da Quantidade de Movimento no Módulo 2DH	30
4.4.4	Condições de Contorno	33
4.4.5	Condições Iniciais.....	33
4.4.6	Métodos Computacionais Hidrodinâmicos de Alagamento e Secamento.....	33
4.4.7	Métodos de Alagamento e Secamento Presente no SisBaHiA® ...	34
4.5	MODELAGEM LAGRANGEANA DE TRANSPORTE ADVECTIVO DIFUSIVO PARA TRANSPORTE DE SEDIMENTOS SUSPENSOS	38
4.5.1	Equações Governantes do Modelo de Transporte Lagrangeano Advectivo-Difusivo	39
4.5.2	Sobre a Caracterização das Fontes	39

4.5.3	Quanto ao Volume Prismático da Fonte (40
5	MATERIAIS E MÉTODOS	41
5.1	SISTEMA ESTUARINO DO RIO SANTA MARIA DA VITÓRIA – ES.	41
5.2	MODELAGEM HIDRODINÂMICA	44
5.2.1	Contorno do Domínio e Malha do Modelo	44
5.2.2	Dados Batimétricos e Topográficos	47
5.2.3	Condições Iniciais e de Contorno	48
5.2.4	Dados Primários (Maré e Corrente): Calibração do Modelo Hidrodinâmico	56
5.2.5	Rugosidade Equivalente de Fundo	57
5.2.6	Parâmetros Relacionados ao Processo de Alagamento e Secamento	59
5.2.7	Análise Estatística para Validação do Modelo Hidrodinâmico	59
5.3	MODELAGEM DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO	61
5.3.1	Determinação dos Parâmetros da Fonte	64
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
6.1	CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO	67
6.1.1	A Maré	67
6.1.2	As Correntes de maré	70
6.2	AVALIAÇÃO DA SIMULAÇÃO DAS ÁREAS ALAGÁVEIS NO CONTROLE DA SEDIMENTAÇÃO	74
6.3	DISTRIBUIÇÃO DE SEDIMENTOS SUSPENSOS NA BAÍA DE VITÓRIA	77
6.3.1	Período de cheia (fevereiro de 2013)	77
6.3.2	Período de estiagem (agosto de 2015)	81
6.3.3	Análise integrada das zonas de sedimentação	84
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	86
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

1 INTRODUÇÃO

Estuários apresentam uma formação geomorfológica recente, e sua vida depende da relação entre às variações relativas do nível do mar e da razão de sedimentação (MIRANDA *et al.*, 2002). Esses ambientes são os receptores primários de retenção de sedimentos entregue à costa por rios, sua geomorfologia e propriedades hidrodinâmicas são essenciais para definir a capacidade que cada estuário possui de reter sedimentos dentro do sistema (PERILLO; SYVITSKI, 2010).

A vazão fluvial e a maré são as principais forçantes atuantes na dinâmica estuarina e no transporte de sedimento dentro desse sistema, em menor escala as forçantes meteorológicas, a geometria do estuário e as ondas. Desta forma, ao estudar o comportamento dos sedimentos suspensos neste ambiente, pode-se estabelecer o seu local de residência e a influência de cada forçante no transporte desses ao longo do sistema (NICHOLS; BIGS, 1985).

Um sistema estuarino desenvolvido entre três unidades geomorfológicas distintas e com uma importância econômica bastante expressiva é o estuário do Rio Santa Maria da Vitória. Esse sistema é caracterizado por apresentar um dos principais portos brasileiros e por ser circundado por extensivas áreas de planícies de maré (Projeto RADAMBRASIL, 1983).

A presença das planícies de maré em estuários desempenha um papel importante na característica do sistema, uma vez que são zonas sujeitas a acumulação de compostos (sedimentos, nutrientes, entre outros) transportados pela água e dissipados pela energia do local, sendo assim responsáveis pela evolução geológica do ambiente (SCHOELLHAMER, 2002).

Conclui-se então que a investigação do regime fluvial associado ao transporte de sedimentos suspensos em estuários com presença de planícies de maré torna-se de grande interesse para engenheiros costeiros e cientistas no que tange as atividades relacionadas à construção de portos, proteção da costa e manejo em geral. Além disso, a análise da distribuição desses sedimentos pode servir como ferramentas auxiliaadoras na dispersão de poluentes e matéria

orgânica que podem ser carregados adsorvidos a esses sedimentos (WANG *et al.*, 2001).

O transporte dos sedimentos suspensos depende do tamanho, peso específico das partículas, formato, e das condições hidrodinâmicas locais como turbulência, cisalhamento e velocidade. (SUGUIO, 2003). Portanto, devido à complexidade em representar esse sistema, pesquisadores recorrem a ferramentas computacionais que possuem a capacidade de integrar as informações dispersas nestes sistemas (ROSMAN, 2014).

A principal vantagem da modelagem matemática é a capacidade de realização de prognósticos através da simulação de cenários passados e futuros, como a presença de estruturas ainda não construídas, ou a ocorrência de condições ambientais extremas. A modelagem hidrodinâmica também pode ser utilizada para a realização de diagnósticos, no caso de escassez de dados de monitoramento disponíveis, bem como para modelagem de outros processos a ele associado (e.g. transporte de sedimentos, qualidade da água, entre outros) (BATES; HORRITTS, 2005; ROSMAN, 2014).

Assim, o estuário do Rio Santa Maria da Vitória foi utilizado como a área de pesquisa, buscando a reprodução da sua hidrodinâmica local e da influência das extensas planícies de maré que circundam esse sistema nas zonas de sedimentação primária dos sedimentos suspensos transportados por esse tributário.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Caracterizar a distribuição dos sedimentos suspensos em diferentes regimes fluviais em um ambiente estuarino de micromaré, circundados por mangue, utilizando à modelagem computacional.

2.2 ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Calibrar a simulação hidrodinâmica estuarina, considerando a elevação da superfície da água e das correntes;
- Avaliar o comportamento das áreas alagáveis na distribuição dos sedimentos suspensos transportados;
- Avaliar a competência de uma vazão fluvial e da carga de sedimento carregada por essa em um período de cheia e outro de estiagem ao longo do estuário.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PROCESSOS ESTUARINOS

Dyer (1997) “Estuário é um corpo de água costeiro semifechado com conexão livre com o oceano aberto, estendendo-se rio acima até o limite da influência da maré, sendo que em seu interior a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental”.

De acordo com Miranda *et al.* (2002), os estuários possuem modelos de circulação muito variáveis no tempo e no espaço. Além disso, o fluxo de água doce, a ação dos ventos, as oscilações de maré e a geometria do estuário, afetam, predominantemente, o comportamento hidrodinâmico. Estes fatores, agindo separadamente ou em sinergia, geram um padrão de escoamento bastante complexo (Figura 1).

Figura 1: Forçantes atuantes em um estuário.



Fonte: Dalrymple *et al.* (1992).

A bacia de drenagem é a origem do sistema de rios que suprirá o estuário de água fluvial, de substâncias orgânicas e inorgânicas, de sedimentos e eventualmente poluentes. No entanto, a quantidade de água aportada pela bacia depende das características do solo, clima, da cobertura vegetal, da ocupação urbana, industrial e agrícola e da evapotranspiração na região de captação e de suas influências mútuas (JOHSON, 2013).

A corrente de maré é a principal responsável pela intrusão salina dentro do sistema e, conseqüentemente, pela geração do gradiente de densidade e pela

circulação estuarina (DOLGOPOLOVA; ISUPOVA, 2010). As marés apresentam amplitudes variadas dependendo da região costeira em que são inseridas. Segundo Dyer (1997), essas amplitudes podem ser divididas em: Micromarés (~0 a 2 m), Mesomarés (2 a 4 m), Macromarés (4 a 6 m) e Hipermarés (acima de 6 m de altura). Desta forma, de acordo com Miranda *et al.* (2002), a dominância da maré no ambiente pode classifica-lo em: bem misturado, moderadamente ou parcialmente misturado e de cunha salina ou altamente estratificados.

O vento é uma forçante que pode provocar tanto a quebra da estratificação das camadas superiores, ser responsável pela geração de ondas ou até mesmo ocasionar a mistura vertical da coluna d'água em estuários rasos, ou seja, estuários que apresentam largura de aproximadamente 500 m e que se estreita estuário acima. Entretanto, ventos intensos e constantes podem aumentar a estratificação da coluna d'água em estuários profundos, auxiliando as massas d'águas de origem continental a se deslocarem sobre as águas mais densas, de origem marinha (DOLGOPOVA, 2014).

Além dos fatores citados, estuários que apresentam com presença de zonas entremarés desempenham um papel multifuncional nestes ambientes, desde dissipação de energia, mitigação de processos sedimentológicos até contribuição nos ciclos dos nutrientes (COX *et al.*, 2006).

Desta forma, a complexidade de corpos de águas naturais, especialmente estuários, lagos, reservatórios e zonas costeiras adjacentes as bacias hidrográficas demandam à aplicação de modelos computacionais para projetos, estudos e auxílio à gestão dos recursos hídricos, os quais são ferramentas que auxiliam na integração de informações dispersas nos sistemas ambientais (ROSMAN, 2014).

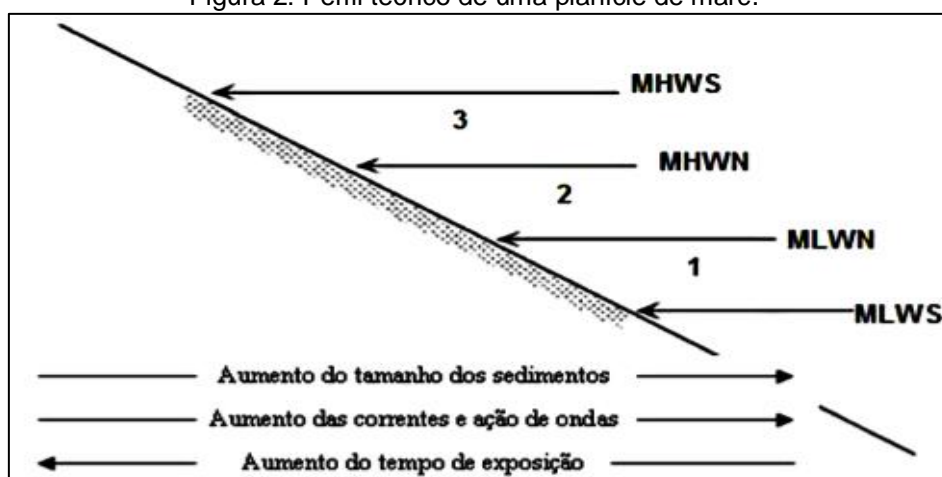
3.2 HIDRODINÂMICA EM REGIÕES DE PLANÍCIES DE MARÉ

As planícies de maré são habitats sedimentares intermarés formados pela deposição de sedimentos em ambientes costeiros de baixa energia (DE BACKER *et al.*, 2010). As características dessas áreas são determinadas por

complexas e cumulativas interações entre mudanças do nível d'água, hidrologia, dinâmica de sedimentos, processos orientados por tempestades, subsidência, colonização e distúrbios por parte de animais (VARNELL *et al.*, 2003).

De acordo com Klein (1972 *apud* DYER *et al.*, 2000), o perfil teórico de uma planície de maré pode ser dividido em três faixas, em função de quatro níveis de marés principais: as médias das mínimas (MLWS) e máximas (MHWS) marés de sizígia, e as médias das mínimas (MLWN) e máximas (MHWN) marés de quadratura. Na Figura 2 apresentada podem ser visualizadas a ilustração de tais níveis. Estes níveis são responsáveis por interferir nos principais processos físicos que acontecem nessas áreas, uma vez que delimitam zonas temporais de exposição ao processo de alagamento e secamento (SWINBANKS, 1982).

Figura 2: Perfil teórico de uma planície de maré.

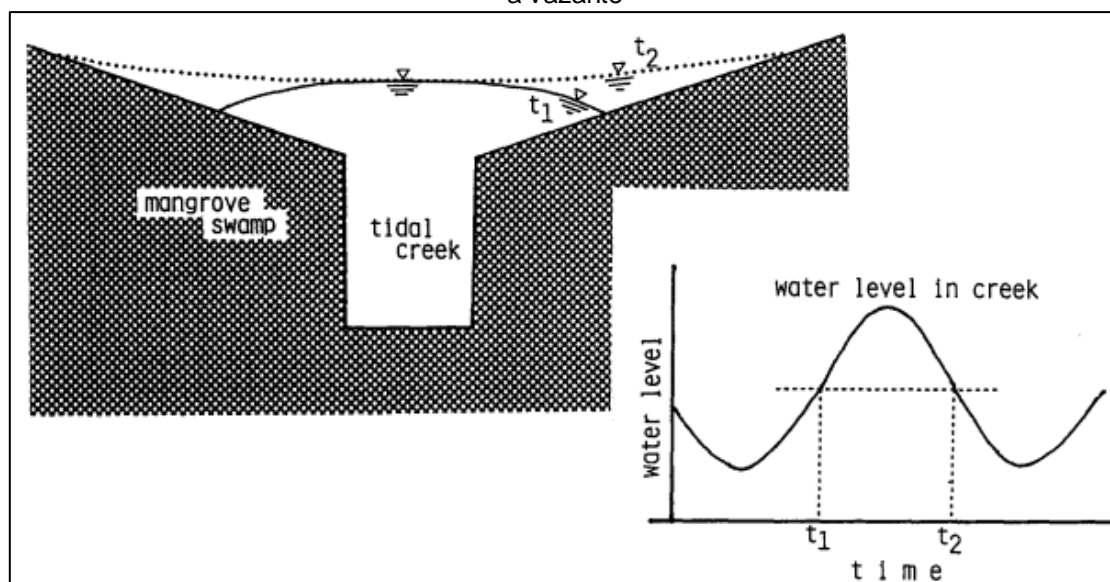


Fonte: Extraído de Gallo (2009).

A corrente de maré é o principal agente físico responsável pelo alagamento e secamento das planícies, portanto é o fator determinante da existência destas na região. Enquanto a propagação da maré em canais apresenta um padrão retilíneo e reversível dado pela componente longitudinal, nas planícies de marés, os vetores de velocidades apresentam um padrão circular no decorrer de um ciclo completo, procedente da componente transversal (PERILLO *et al.*, 1993; LE HIR *et al.*, 2000).

Mazda *et al.* (1997) observaram uma assimetria da maré nos canais do mangue. Esta assimetria foi associada à mudança de sinal da maré, devido à fricção com o leito e as raízes do mangue, conforme esquematizado na Figura 3. A partir da interpretação desta figura, verifica-se que há uma diferença entre os níveis de água entre a borda dos canais e do mangue, embora os níveis nos canais em t_1 e t_2 sejam iguais. Isso significa que a onda de maré se propaga mais rapidamente nos canais do que nas planícies de maré, portanto o abaixamento do nível d'água se dá primeiro nos canais e depois nas planícies inundáveis o que gera um gradiente de declividade da linha de água e correntes fortes durante o último estágio de vazante (DRONKERS, 1986).

Figura 3: Níveis d'água em um canal de maré e na floresta do manguezal durante a enchente e a vazante



Fonte: Adaptado de Mazda *et al.* (1997).

Desta forma, em geral, as magnitudes das correntes sobre as planícies são menores que as encontradas nos canais, o que fornece indícios dessas áreas serem de acumulação, devido ao aprisionamento lateral (*trapping*) da água do canal (LE HIR *et al.*, 2000; WOLANSKI *et al.*, 1990). Verifica-se, então, a importância da representação das particularidades de cada ambiente para a reprodução da hidrodinâmica local, uma vez que estas influenciam diretamente nos transportes a ele associado.

3.3 TRANSPORTE DE SEDIMENTO EM ESTUÁRIO

Segundo Uncles *et al.* (1994) e Schoellhamer (2002), os sedimentos depositados ou em trânsito em um estuário são provenientes da área continental adjacente, originários do mar (correntes e ondas) ou supridos dos rios. Ao longo do processo de transporte ocorre um processo contínuo de deposição, erosão e transporte, sendo esses processos dependentes da dinâmica do fluxo e das propriedades das partículas (forma, tamanho, composição e densidade). Portanto, a circulação de sedimentos no estuário tende a apresentar um comportamento cíclico (NICHOLS; BIGGS, 1985).

Carvalho (1994), ao propor um padrão de transporte desses dentro do sistema, o dividiu em três formas diferentes, sendo elas:

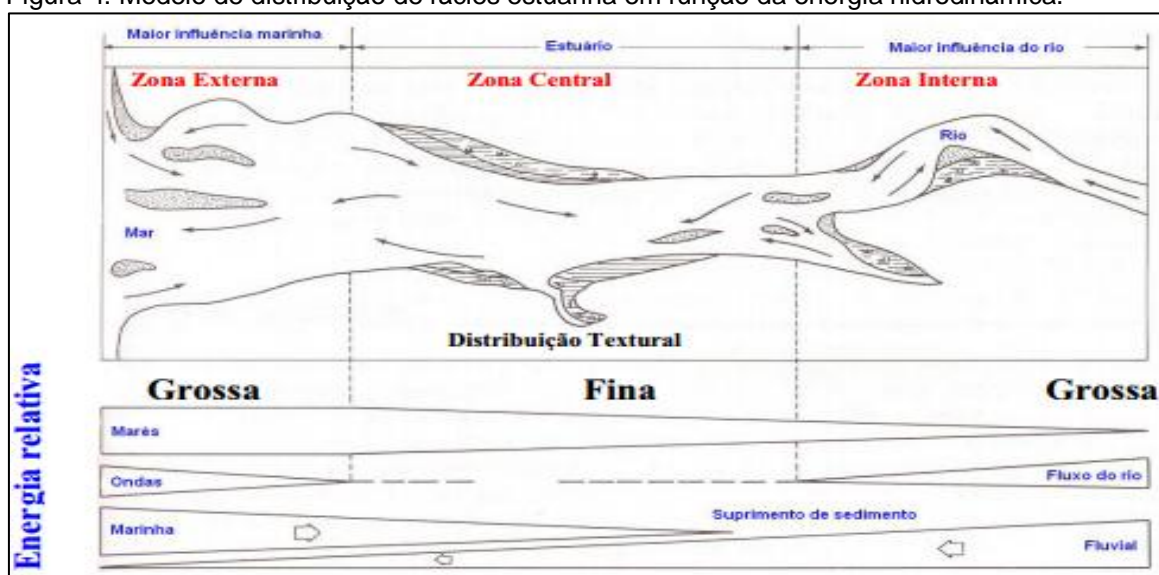
- Carga sólida de arrasto: são as partículas que rolam ou escorregam, permanecendo a maior parte do tempo em contato com o leito, devido serem relativamente grandes e pesados (e.g. areias e cascalhos). Admite-se que transporte por arrasto ocorre quando a velocidade de sedimentação do grão prevalece sobre a sucessão de impulsos verticais provenientes de vórtices turbulentos.
- Carga sólida dissolvida: composta pelos minerais provenientes da dissolução química dos minerais e os quais são transportados em águas correntes.
- Carga sólida em suspensão: composta predominantemente pelas partículas argilosas e silticas que são suficientemente leves e/ou apresentam formas que permitem com que estes permaneçam suspensos na coluna d'água. Desta forma, o transporte de sedimento em suspensão ocorre quando a velocidade de sedimentação do grão é compensada por uma sucessão de impulsos verticais provenientes de vórtices turbulentos.

Do ponto de vista geológico, os estuários funcionam como armadilhas desses sedimentos (PERILLO, 1995). Para esse autor, a função natural deste ambiente é atuar como verdadeiros filtros, retendo o sedimento de granulometria mais grossa e ejetando parcialmente os sedimentos mais finos.

Ao sugerir um padrão de distribuição esperado dentro de um estuário, Dalrymple *et al.* (1992), subdividiram este em três zonas, conforme apresentado na Figura 4. Segundo os autores, essas podem ser descritas como:

- Zona externa – de domínio marinho, com ação das ondas junto à embocadura, apresentando alta energia das correntes de maré e a baixa atuação da corrente fluvial. Nesta zona há ocorrência de deposição de fácies de sedimentos com granulação mais grossa;
- Zona central – onde há a atenuação da energia total que chega ao sistema (maré, onda, rio) para a porção central do estuário, sendo nesta zona depositadas as fácies de sedimentos mais finos. Nesta área podem ser encontrados sedimentos de origem fluvial e marinho;
- Zona interna – de domínio fluvial, onde se observa uma região de energia mínima da ação das marés em direção à montante do estuário, com predominância da textura sedimentar novamente grossa.

Figura 4: Modelo de distribuição de fácies estuarina em função da energia hidrodinâmica.



Fonte: Dalrymple *et al.* (1992).

Portanto, dentro do sistema, a mobilização destes sedimentos é dependente, principalmente, da intensidade da descarga líquida. As correntes de maré e as ondas atuam apenas nas proximidades da foz, transportando os sedimentos da antepaia para frente dos estuários (WOLANSKI *et al.* 1995).

Desta forma, o conhecimento da distribuição dos sedimentos associado ao regime fluvial pode auxiliar no gerenciamento da bacia, bem como monitorar compostos adsorvidos a esses sedimentos.

3.4 RELAÇÃO VAZÃO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS SUSPENSOS

Como dito anteriormente, o transporte dos sedimentos na zona central do sistema estuarino está diretamente associado a intensidade da descarga fluvial. No entanto, a concentração de sedimentos também é um importante mecanismo controlador no processo de transporte e deposição, isto porque, apresenta um efeito inibidor da sedimentação para altas concentrações de material em suspensão (DYER, 1986).

Do ponto de vista físico, as principais forçantes que atuam sobre a dinâmica fluvial e no transporte de sedimentos em um sistema estuarino são: a tensão de cisalhamento e a força da gravidade. A tensão de cisalhamento por unidade de área é à força de atrito existente entre o canal e o líquido em movimento, implicando em uma resistência ao escoamento e ao transporte de sedimentos. A força de gravidade é a força vertical exercida pela massa líquida sobre o canal e direciona o fluxo das áreas com maior declividade para as partes mais baixas (SUGUIO, 2003; CARVALHO, 2008). Portanto, quando as forças hidrodinâmicas atingem valores superiores aos das forças de resistência, verifica-se o deslocamento do grão de sedimento e consequente distribuição ao longo do ambiente.

Percebe-se que a natureza procura sempre um equilíbrio próprio, considerável estável para o rio. Se há mudança na quantidade de descarga sólida, o rio responde reagindo conforme as alterações impostas. Assim, se a carga sólida é grande, haverá uma tendência de formação de depósitos, ocorrendo a “agradação” do leito do rio. Ao contrário, se a carga sólida é pequena, o rio responde com a degradação do leito (CARVALHO, 2008).

A depender da intensidade da descarga líquida, episódios de alta energia (enchentes) apresentam particular importância, pois em um curto período de tempo, apresenta capacidade de movimentar uma carga sedimentar superior à

verificada durante longos períodos de condições normais (MANTOVANELLI *et al.*, 1999).

De forma geral, os sedimentos transportados formam uma onda que acompanham a enchente de três formas diferentes: a) com o pico de sedimentos se antecipando ao pico de enchentes; b) simultaneidade dos picos de enchente e de sedimentos e c) pico de sedimentos se atrasando ao pico de vazão (CARVALHO, 1994). Além disso, quando há uma mudança brusca no regime, como a construção de uma barragem e formação de um reservatório, essa mudança se traduz por grandes depósitos de sedimentos no reservatório, o que corresponde a “agração” do leito. Da mesma forma, se há uma mudança drástica a jusante da barragem devido à falta de descarga sólida e mudança de regime, desencadeando o processo de degradação do leito e margens (BRUK, 1985).

3.5 DISTRIBUIÇÃO DE SEDIMENTOS SUSPENSOS ASSOCIADO AO REGIME FLUVIAL EM ESTUÁRIOS COM PRESENÇA DE PLANÍCIES DE MARÉ

Regiões de acúmulo de sedimentos são vistos como indicativo da saúde do sistema estuarino. Assim, para monitorar e controlar o comportamento do estuário, o modelo empregado também precisa ser capaz de prever os diversos mecanismos de retenção e transporte dos sedimentos a ele associado (PERILLO; SYVITSKI, 2010).

Estuários que apresentam assimetria de maré decorrente da presença de planícies de maré apresentam significativa influência no transporte sedimentar (LE HIR *et al.*, 2000; WANG; WANG, 2010). De acordo com Mao *et al.* (2004) essa assimetria exerce efeitos tanto na evolução geológica de estuários rasos, quanto na navegabilidade de canais estuarinos.

Ao estudarem a influência das planícies de maré em diferentes regimes fluviais, Schettini *et al.* (2009) constataram que as planícies de maré presentes no

estuário funcionam como um mecanismo de armadilha de sedimento, principalmente em período de baixa vazão.

Ao estudar a variação da vazão e o aporte sedimentar do Rio Santa Maria da Vitória, Dalmaschio (2008), constatou que o período seco é responsável por um *input* muito baixo de aporte sedimentar para o sistema estuarino. No entanto, nos períodos chuvosos, com a vazão aumentando quase uma ordem de grandeza em relação ao período seco, este é responsável por propiciar grande fluxo sedimentar para o sistema.

Ao analisar o transporte de sedimento no estuário de Delaware, Dolgoplova (2014) verificou que houve deposição de sedimentos ao longo de todo o estuário, com as classes granulométricas variando dentro de amplos limites. No entanto, no zoneamento feito ao longo do estuário a fim de determinar as suas fronteiras, o autor verificou acúmulo de sedimentos grossos na seção da foz do estuário, apresentando, assim, indícios de zonas de erosão. Já os sedimentos finos acumularam-se em regiões de confluência entre a vazão fluvial e a onda de maré, nesse caso, onde a turbulência prevaleceu.

Bastos *et al.* (2007) verificaram predomínio de sedimento lamoso na Baía de Vitória, Rio Santa Maria da Vitória, e arenoso na Baía do Espírito Santo ao analisarem a dinâmica sedimentar e a morfologia de fundo do sistema estuarino. Essa distribuição sedimentar foi associada à reflexão das características hidrodinâmicas do sistema estuarino.

Ao estudarem as regiões de aprisionamento de sedimentos suspensos no Estuário de Changjiang, Wu *et al.* (2012), verificaram que o aprisionamento frequentemente ocorre durante a aceleração e desaceleração, característica essa justificada pelo período ser responsável pela ressuspensão e/ou deposição do sedimento, de acordo com a sazonalidade do sistema.

A maioria dos trabalhos rever o aprisionamento de sedimentos devido à ação das correntes e ondas associadas aos mangues, bem como a competência da vazão fluvial neste transporte. No entanto, segundo Perillo e Syvitski (2010), interações físico-biológicas pode ser um mecanismo de captura e preservação

do sedimento nos estudos, devido colocarem os sedimentos em uma posição prontamente disponíveis para o transporte.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 MODELAGEM COMPUTACIONAL

Devido à sua praticidade, métodos matemáticos continuam sendo os mais utilizados e confiáveis, atualmente. No entanto, esses métodos também apresentam deficiências de análise, resultantes, por exemplo, da escassez ou da falta de dados confiáveis ou da baixa qualidade dos dados obtidos em campo para sua calibração (ROSE; THORNER, 2001).

4.2 ESCOLHA DO MODELO

Para a determinação do modelo considerou-se principalmente a sua aplicação no fenômeno estudado. O SisBaHia[®] é um modelo empregado, basicamente, para previsão de escoamento ou movimento das águas, previsão da qualidade das águas e de transporte de grandezas escalares. Tal modelo tem sido utilizado em diversos estudos como ferramenta de auxílio ao desenvolvimento de projetos e estudos da gestão ambiental de recursos hídricos, isto é, uma forma de gestão que considera conjuntamente os aspectos de qualidade e quantidade dos recursos hídricos.

4.3 O SISBAHIA[®]

O SisBaHia[®] – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental, é um sistema profissional de modelos computacionais registrado pela Fundação COPPETEC, órgão gestor de convênios e contratos de pesquisa do COPPE/URFRJ – Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), o mesmo vem sendo atualizado constantemente desde 1987.

O sistema possui vários módulos que interagem diretamente com os programas *Argus One*, *Grapher* e *Surfer*, sendo esses programas utilizados para a confecção de malhas, saídas para gráficos e mapas, respectivamente.

Além disso, o sistema dispõe de um detalhado manual de uso, mostrando passo a passo como desenvolver malhas e modelos.

O SisBaHia[®] possui um modelo hidrodinâmico de Linhagem FIST3D (*Filtered in Space and Time 3D*), otimizado para corpos de água naturais. Trata-se de um eficiente modelo numérico hidrodinâmico, tridimensional, para escoamentos homogêneos e de grande escala. Este apresenta um módulo 2D, que calcula correntes promedias na vertical e a elevação da superfície livre e um módulo 3D que calcula o campo de velocidade tridimensional, com suas opções de metodologia definidas pelo usuário. O esquema numérico resultante é extremamente eficiente e robusto. Em geral, obtêm-se excelentes resultados com número de *Courant* médio em torno de 5.

O FIST3D pode ser usado tanto para regiões que apresentam escoamentos sensíveis à baroclinidade, quanto para regiões com efeitos barotrópicos. No entanto, deve-se se atentar para a hidrodinâmica local e aplicar o módulo que seja mais eficiente em expressar a realidade da área no estudo e o que apresente menor instabilidade na resolução do problema.

4.4 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Considerando que o corpo de água estuarino está confinado a uma geometria particular, especial atenção deve ser dada às transformações e simplificações dessas equações necessárias a soluções numéricas e analíticas da circulação e processos de mistura.

A inclusão de termos baroclínicos na simulação dos problemas em questões seriam pouco relevantes, considerando: a pouca significância dos efeitos baroclínicos na circulação geral do estuário para a análise do fenômeno estudado; dificuldade para obtenção de condições de contorno corretas; esforço computacional adicional e a inexistência de dados que permitam uma efetiva calibração baroclínica.

Desta forma, a fim de simplificar a simulação hidrodinâmica do presente trabalho, pode-se considerar o estuário do Rio Santa Maria da Vitória como um sistema barotrópico e utilizar o Modelo Hidrodinâmico no Módulo 2DH.

4.4.1 Equações Governantes do Modelo Hidrodinâmico 2DH

Para cada intervalo de tempo, o módulo 2DH determina as componentes das velocidades médias na vertical, na direção x e y , e as elevações da superfície livre. As componentes da velocidade média na vertical podem ser definidas conforme apresentado na Equação 1.

$$u = \frac{1}{\Delta z} \int_{-H}^{\eta} u \, dz \quad (1)$$

Onde u é a velocidade média na vertical.

4.4.2 Equações da Continuidade do Volume – 2DH

Considerando uma batimetria permanente durante todo o período de simulação, i.e., $\frac{\partial H}{\partial t} = 0$, a equação da continuidade do volume pode ser escrita conforme a Equação 2.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u \eta) + \frac{\partial}{\partial y} (v \eta) = 0 \quad (2)$$

4.4.3 Equações da Quantidade de Movimento no Módulo 2DH

As Equações 3 e 4 definem, respectivamente, a quantidade de movimento para um escoamento integrado na vertical na direção x e y no Módulo 2DH. A Figura 5 apresenta o significado dos termos das equações 3 e 4.





— — — — —

(3)

— — — — —

(4)

Figura 5: Definição dos termos das equações da quantidade de movimento utilizando a direção x como exemplo dos significados dos termos nas equações (3) e (4).

	Representa a aceleração local do escoamento 2DH, i.e., em uma dada posição, a taxa de variação temporal da quantidade de movimento média na vertical por unidade de massa. Em escoamentos permanentes, esse termo é igual a zero.
	Representa a aceleração advectiva do escoamento 2DH, i.e., em um determinado instante, representam o balanço dos fluxos advectivos médios na vertical, por unidade de área, a de quantidade de movimento na direção x, por unidade de massa. Em escoamentos uniformes, esses termos são iguais a zero.
	Representa a variação da pressão hidrostática na direção x (gradiente de pressão), devido à declividade da superfície livre na direção x. Conforme indicado pelo sinal negativo, este termo força escoamento de lugares onde o nível da água é mais alto para onde o nível da água é mais baixo.
	Representa a tensão de atrito do fundo atuante no escoamento 2DH por unidade de massa. Conforme indicado pelo sinal negativo, esse termo sempre tende a desacelerar o escoamento. É sempre oposto ao escoamento.

Fonte: Rosman (2014).

A tensão do vento na superfície livre foi negligenciada, uma vez que apresentam baixa influência no objetivo deste trabalho. No entanto, as tensões de atrito do fundo podem ser definidas pela Equação 5, descrita como:

(5)

Onde é a massa específica da água em kg/m³; é a velocidade média na coluna d’água em m/s e , no caso do modelo 2DH, conforme utilizado no estudo, pode ser calculado pela Equação 6.

 (6)

Na equação 6, g representa a gravidade em m/s^2 ; u e v as componentes verticais em m/s e C representa o coeficiente de Chézy, calculado conforme a Equação 7.

$$C = \frac{48.3}{n} \quad (7)$$

Onde n é o parâmetro da rugosidade do fundo em (m) e h é a profundidade em (m). No entanto, para que o modelo consiga resolver as equações acima descritas, é necessário que condições de contorno e iniciais sejam conhecidas.

4.4.4 Condições de Contorno

As condições de contorno impostas pelo modelo podem ser na direção horizontais ou verticais, sendo as condições horizontais de dois tipos: de terra ou abertos. Os contornos de terra caracterizam as margens do corpo d'água no domínio. A fronteira aberta representa o limite do domínio de modelagem, não sendo um limite físico, mas sim do modelo. Para as condições de contorno verticais considera-se a velocidade nula no fundo.

4.4.5 Condições Iniciais

Para as condições iniciais é preciso fornecer informações para o instante inicial da simulação. Além disso, os valores de elevação da superfície livre e as componentes da velocidade 2DH () para todos os nós do domínio.

4.4.6 Métodos Computacionais Hidrodinâmicos de Alagamento e Secamento

Fluxos de água em ambientes rasos são fortemente influenciados pela topografia e, assim, o desenvolvimento numérico para representar o fluxo nessas áreas na modelagem computacional requer a disponibilidades de dados

topográficos coletados *in situ* ou modelos digitais de elevação que apresentem dados com boa escala e precisão (BATES; HORRITT, 2005).

As dificuldades da representação dessas áreas alagáveis estão ligadas principalmente a alguns fatores, como: (i) a conservação do momentum e da massa que podem ser afetados por escoamentos fictícios entre os elementos secos e molhados, (ii) conhecimento insuficiente da lei de atrito de fundo que descreve o escoamento característico das áreas alagáveis sobre batimetria irregular que possui a mesma ordem de grandeza da profundidade de escoamento e (iii) o cálculo pode se tornar instável devido ao tratamento inadequado das pequenas profundidades de água encontradas (BALZANO, 1998).

As aproximações utilizadas nos algoritmos de alagamento e secamento podem ser divididas em 2 categorias, sendo elas: Métodos de Malha Fixa e Métodos de Malha Móvel (BATES; HORRITT, 2005). Os Métodos de Malha Móvel são considerados por alguns autores como os mais precisos em estudos de modelos hidrodinâmicos. No entanto, este exige um alto custo computacional, uma vez que a malha necessita ser recalculada em cada espaço de tempo.

Assim, os algoritmos de alagamento e secamento que se baseiam nos Métodos de Malha Fixa se encaixam em quatro categorias principais, sendo elas: Filme Superficial, Exclusão de Elementos ou Redução de Malha, Extrapolação da Profundidade e Profundidade Negativa.

Modelos que utilizam elementos finitos geralmente utilizam métodos de Malha Fixa do tipo “Profundidade Negativa”, o que na maioria das vezes estão alinhados às aproximações do tipo “Porosidade Artificial” (MEDEIROS; HAGEN, 2013). E esse é o método presente no SisBaHiA[®].

4.4.7 Métodos de Alagamento e Secamento Presente no SisBaHiA[®]

A modelagem com áreas que podem sofrer alagamento e secamento em função da variação do nível de água pode ser feito de três métodos no SisBaHiA[®], sendo eles:

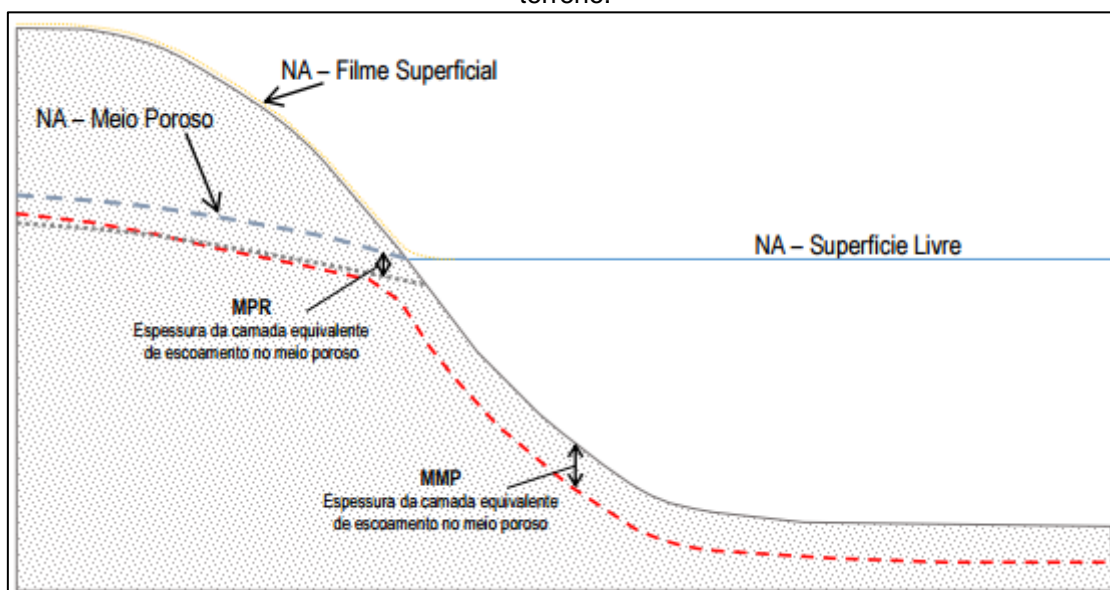
- MPR = Método Poroso-Rugoso
- MMP = Método do Meio Poroso
- MFS = Método do Filme Superficial.

No entanto, cada um apresenta uma particularidade e limitação de acordo com o ambiente em que é aplicado. Os dois primeiros são muito similares, ambos consideram que existe uma faixa de meio poroso abaixo da superfície do terreno quando coberto de água, responsável pela restrição do fluxo de água. Porém, não se trata de uma simulação de escoamento em meio poroso propriamente, mas um efeito equivalente, no qual a água que estaria distribuída em toda a espessura do meio poroso é forçada a fluir por uma camada equivalente que apresenta grande rugosidade e pequena espessura.

Contrário aos métodos acima citados, como ilustrado na Figura 6, no Método do Filme Superficial, MFS, a superfície livre “cola” no terreno em locais em que o nível da água da superfície livre esteja abaixo e as velocidades são nulas. Desta forma, esse método é muito exigente em termos de estabilidade numérica, não sendo recomendados para regiões que sofrem constante efeito do alagamento e secamento.

Barros (2012), ao fazer um teste convencional de escoamento em um canal de maré com presença de planície de maré, verificou-se que no método MMP a profundidade da água é incrementada, afetando a celeridade da onda devido à profundidade adicionada pela camada equivalente. O mesmo não ocorreu no MRP. Em seu estudo, também ficou evidente a eficácia do MRP na modelagem complexa do estuário da Baía de Vitória, onde há extensivas áreas de manguezais e variável batimetria. Dessa forma, para o presente trabalho será adotado o método MPR.

Figura 6: Esquema dos métodos de alagamento e secamento. A parte cinza representa o terreno.



Fonte: Rosman (2014).

O objetivo geral de considerar alagamento e secamento pelo Método Poroso – Rugoso (MPR) é calcular a ocorrência de escoamento subsuperficial em um meio poroso. No entanto, um dado local é afetado pelos efeitos de escoamento subsuperficial apenas quando a altura da coluna de água acima do fundo for inferior a espessura da camada de escoamento equivalente no meio poroso. Além disso, só ocorre fluxo em toda a espessura da camada rugosa – porosa quando a cota do nível de água estiver abaixo da cota do terreno. Desta forma, esta camada é limitada acima pelo nível da água no interior do meio, que é uma incógnita do problema. Assim, para o Método Poroso Rugoso (MPR) são definidos os seguintes parâmetros:

Espessura da camada porosa – Rugosa: em (m);

Fator de rugosidade: r em (m).

Define-se então para cada ponto a cota superior da zona de transição , conforme a Equação 8.

(8)

Considerando a situação do escoamento e os efeitos da camada rugosa-porosa, define-se uma batimetria com porosidade e uma amplitude da rugosidade equivalente com porosidade da seguinte forma:

- Caso 1: Escoamento em meio fluido: $\zeta > z_{ts}$ (Equações 9 e 10):

(9)

(10)

- Caso 2: escoamento em transição: $-h \leq \zeta \leq z_{ts}$ (Equações 11 e 12):

(11)

(12)

- Caso 3: escoamento em meio poroso: $\zeta < -h$ (Equações 13 e 14):

(13)

(14)

Note que no Método Poroso Rugoso, a amplitude e a batimetria da rugosidade em meio fluido, Caso 1, não são afetadas pela camada equivalente de escoamento no meio poroso.

4.5 MODELAGEM LAGRANGEANA DE TRANSPORTE ADVECTIVO DIFUSIVO PARA TRANSPORTE DE SEDIMENTOS SUSPENSOS

Modelos Lagrangeanos são absolutamente seguros, não apresentando problemas de conservação de massa que por vezes ocorrem em modelos Eulerianos. As metodologias de modelos de transporte Lagrangeanos têm se mostrado muito eficiente. Entretanto, há vários casos práticos de modelagem de transporte com conflitos de escala, devido o escalar a ser transportado ocupar grande área do domínio da modelagem. Nestes casos o uso de um modelo de transporte Euleriano pode ser computacionalmente vantajoso (ROSMAN, 2014).

O Modelo Lagrangeano de transporte advectivo difusivo tem a vantagem de utilizar o campo de velocidade gerado pelo modelo hidrodinâmico, além de não estar restrito às eventuais limitações de escala impostas pela grade de discretização do mesmo. Desta forma, este modelo se baseia na trajetória da partícula e é adequado a representar fontes de pequena escala em relação ao domínio.

Utilizando uma grade para registo da massa depositada, estima-se a altura equivalente de sedimentação. A grade de sedimentação acumula apenas a deposição primária das partículas, uma vez que processos de ressuspensão não podem ser considerados. Portanto, as estimativas de alturas sedimentadas geradas pelo Modelo Lagrangeano indicam valores máximos, retratando efeitos de curto prazo. Desta forma, somente nos instantes que se deseja computar a concentração, é gerada uma malha delicada e suficientemente refinada no entorno da nuvem de partículas, permitindo o cálculo com grande acurácia.

As equações físicas referentes ao Modelo Lagrangeano concernem somente ao cálculo do comportamento de cada partícula, sendo o resultado posteriormente agrupado de acordo com os objetivos da modelagem.

Onde: Q é a descarga proveniente da fonte em m^3/s ; C é a concentração de substância presente na descarga da fonte em kg/m^3 ; V é a quantidade de partículas que entra no domínio pela fonte por passo de tempo em segundos.

4.5.3 Quanto ao Volume Prismático da Fonte (

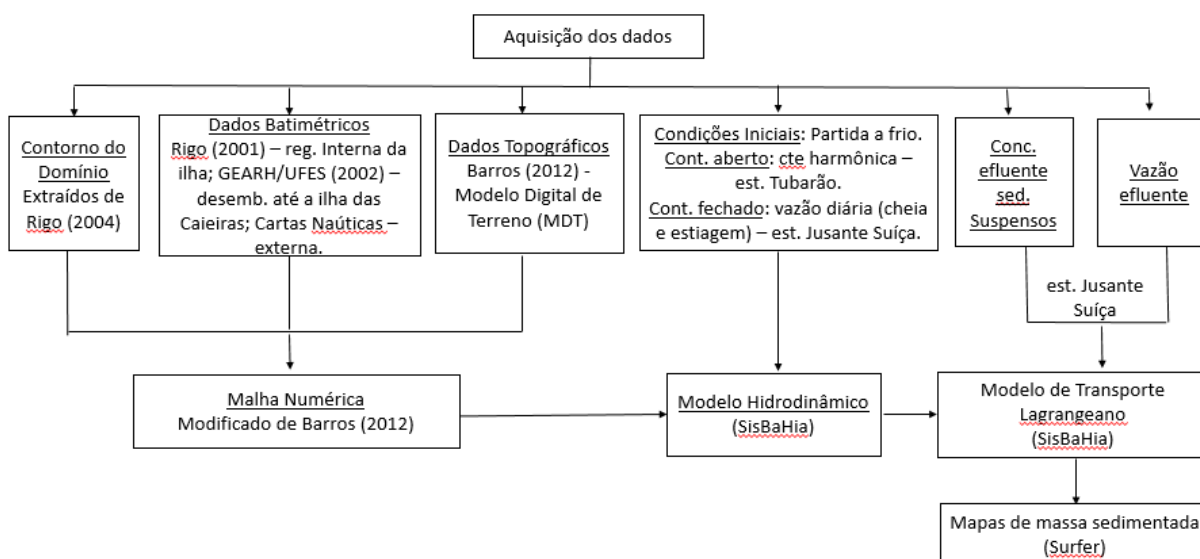
Considerando que uma fonte tem uma determinada carga Q e que o intervalo de lançamento de partículas é Δt , a quantidade total que entrará na região fonte por intervalo de tempo será $Q \Delta t$. Assim, a concentração na região fonte será $C = \frac{Q \Delta t}{V}$, onde V é o volume prismático da região fonte. Além disso, é necessário definir se a altura média do volume prismático da fonte analisada é constante ou variável no tempo e no espaço.

Desta forma, pode-se obter a área do retângulo ou da elipse, através da divisão do volume prismático pela altura média definida H . De acordo com a escolha do formato a forma em planta da região fonte pode ser de uma elipse ou retângulo. Assim, o modelador definirá o comprimento (ou o maior eixo, no caso da elipse), a largura (ou eixo menor) e o ângulo entre o eixo da região fonte e o eixo x da malha.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma metodológico apresentado na Figura 7 apresenta as principais etapas utilizadas para a realização do presente trabalho.

Figura 7: Fluxograma metodológico.



Fonte: Elaborado pela autora.

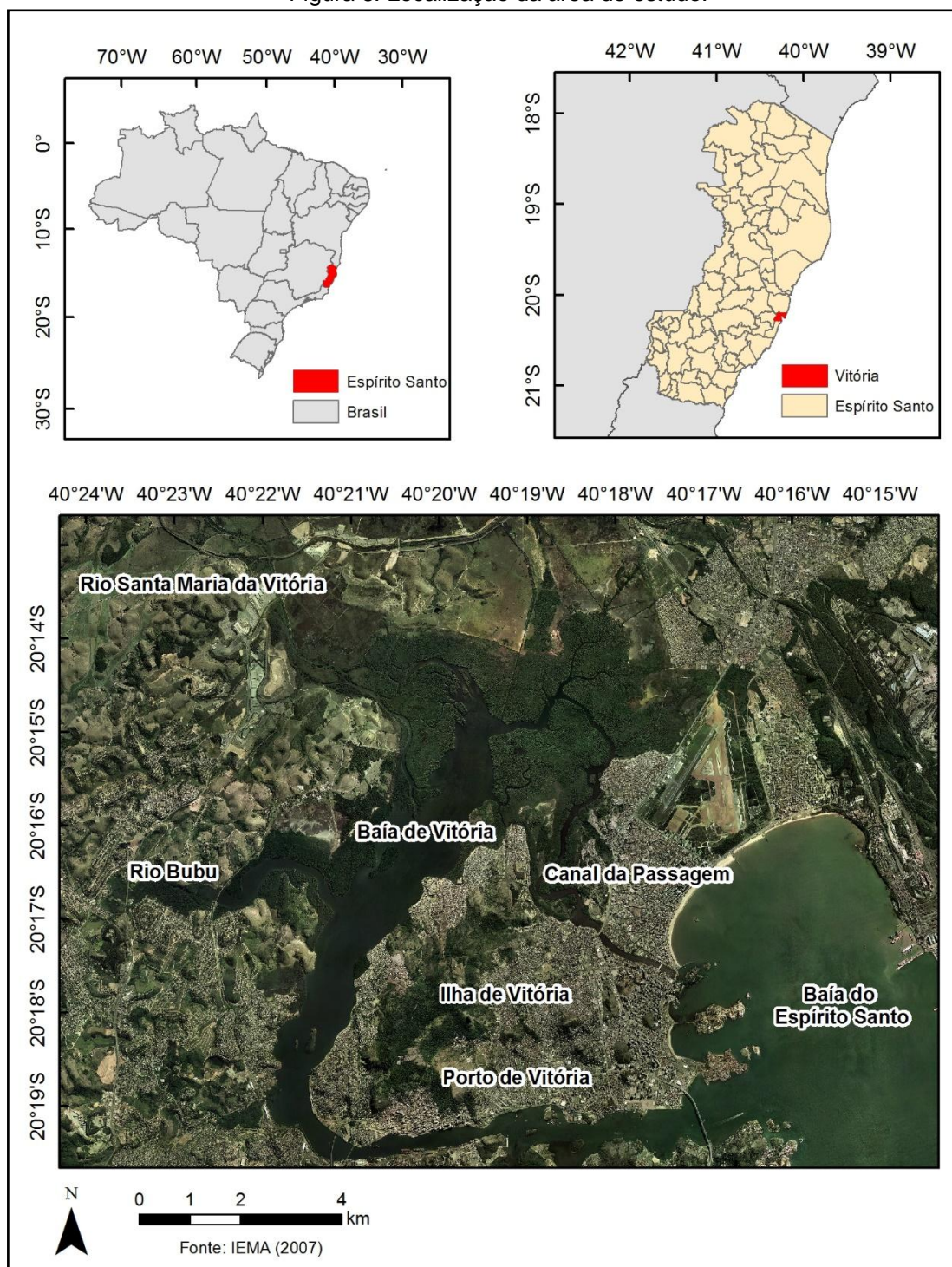
5.1 SISTEMA ESTUARINO DO RIO SANTA MARIA DA VITÓRIA – ES.

A Baía de Vitória compõe parte do sistema estuarino do Rio Santa Maria da Vitória. De grande importância para o desenvolvimento local, uma vez que contém o Porto de Vitória e seu canal de acesso, a Baía de Vitória está compreendida entre a desembocadura do Rio Santa Maria da Vitória até a Baía do Espírito Santo, conforme ilustrada na Figura 8.

Nota-se uma particularidade desse sistema com duas aberturas para o Oceano Atlântico (Canal Principal e o Canal da Passagem). Devido a essa peculiaridade, na região do extremo norte da baía observa-se uma convergência barotrópica denominada como “tombo” da maré, resultante do encontro das frentes de maré que se propagam pelos diferentes canais, conforme descrito por Rigo (2004).

O Rio Santa Maria da Vitória é o aporte fluvial mais importante desse ambiente, contribuindo em média com 15,7 m³/s, com médias mensais variando entre 8,1 e 25,6 m³/s (SANTOS, 1994). Outro aspecto importante é que a vazão que chega a região estuarina é regulada pelas barragens das Usina de Rio Bonito e Suíça, que reservam água durante o dia para liberá-las durante à noite (CSMJ, 1997).

Figura 8: Localização da área de estudo.



Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com a classificação geomorfológica proposta por Miranda *et al.* (2002), o estuário do Rio Santa Maria da Vitória pode ser enquadrado como estuário de planície costeira. CHACALTANA *et al.* (2003) e RIGO (2004) constataram a partir de revisões sobre a classificação das marés que as marés

dominantes na região podem ser enquadradas como micromarés (com a altura da maré menor que 2 m) semidurnas com pequenas desigualdades diurnas. A circulação hidrodinâmica na área da Baía de Vitória é dominada por essas correntes de maré, apresentando velocidades máximas para a região central do Canal Principal em torno de 0,30 a 0,65 m.s⁻¹ nas marés de quadratura e sizígia, respectivamente (ROCHA, 2000).

Chacaltana *et al.* (2003) e Rigo (2004) verificaram também que as mudanças no contorno da Baía de Vitória proporcionaram o surgimento de estreitamentos artificiais. Segundo os autores, esses estreitamentos influenciam diretamente no comportamento das correntes e da maré ao longo de todo o estuário.

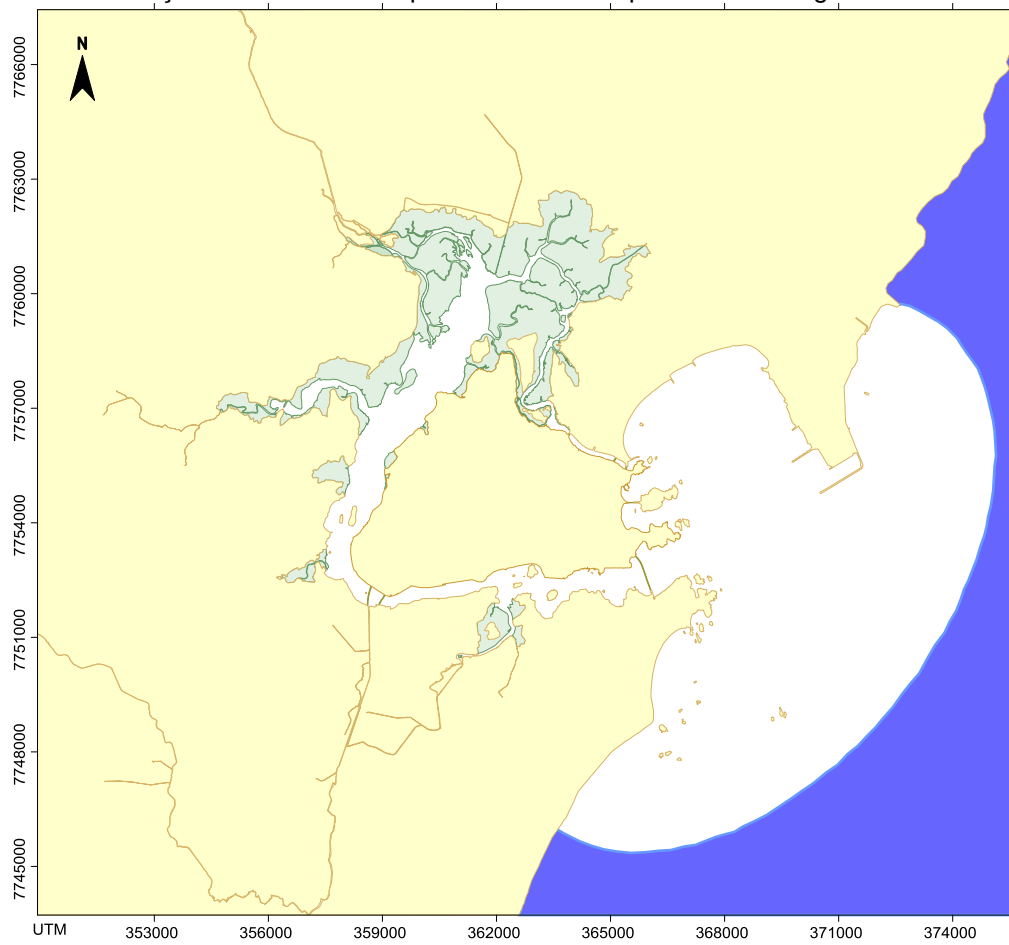
Ainda há poucos trabalhos acerca da circulação hidrodinâmica e da distribuição sedimentar desse sistema estuarino. Dentre os trabalhos que merecem destaque são os realizados por Rigo & Sarmiento (1993); Chacaltana *et al.* (2003); Rigo (2004); D'Agostini (2005); Bastos *et al.* 2007; Veronez *et al.* (2009) e Nascimento (2013).

5.2 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

5.2.1 Contorno do Domínio e Malha do Modelo

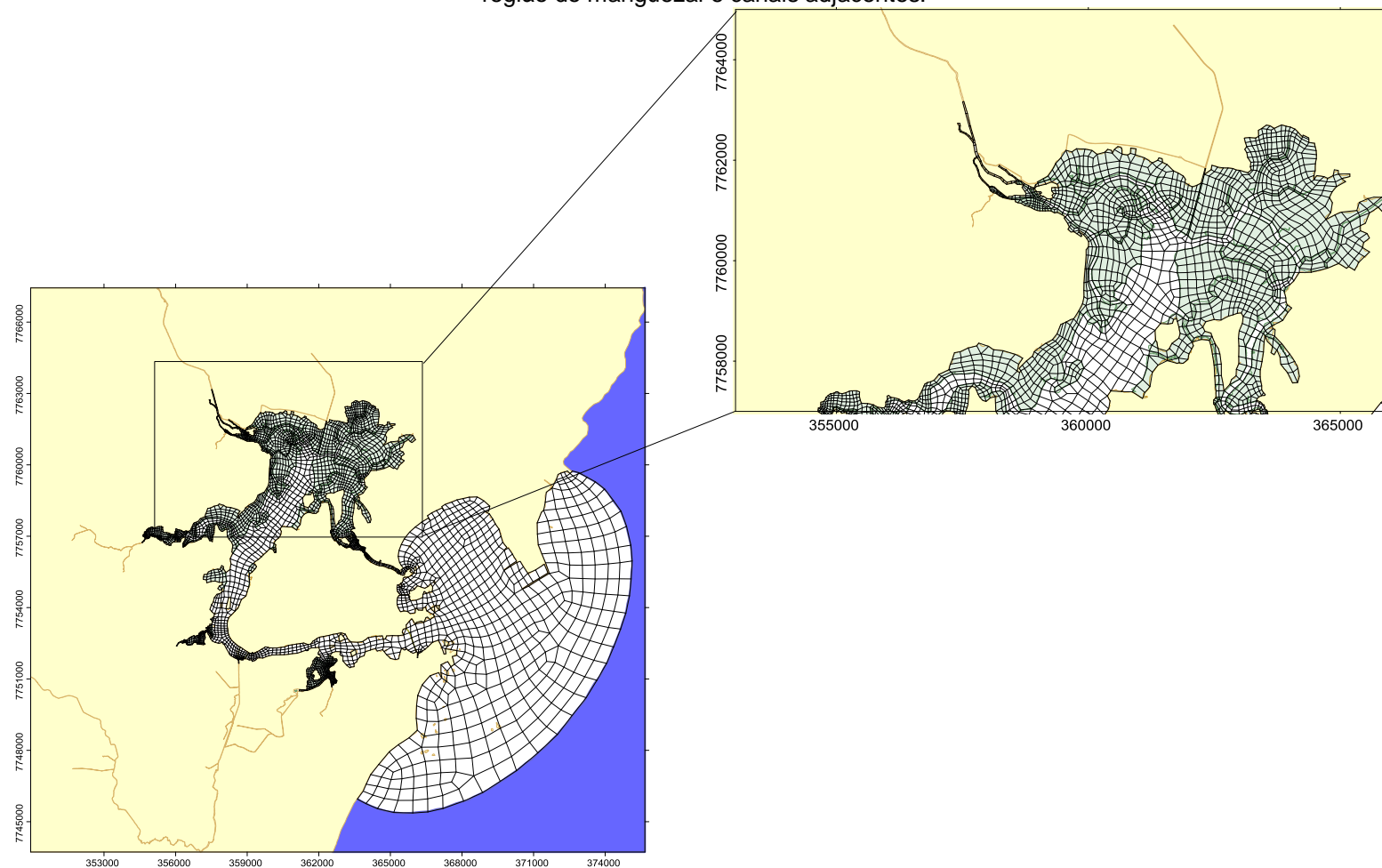
Os contornos do estuário da Baía de Vitória foram extraídos do trabalho de Rigo (2004). O domínio modelado abrange os contornos das regiões da Baía do Espírito Santo, Canal de acesso ao Porto de Vitória, Baía de Vitória e Canal da Passagem, além das regiões de manguezais adjacentes. Os contornos extraídos foram digitalizados através do programa Surfer, gerando o mapa base mostrado na Figura 9, utilizado no processo de modelagem numérica. A Figura 10 apresenta a malha numérica composta de 3949 elementos finitos confeccionada a partir dos limites do mapa base e gerada a partir do programa *Argus One* (versão *Student*).

Figura 9: Mapa base contemplando o contorno da região modelada. Na figura observa-se a consideração no contorno das planícies de maré presentes na região estudada.



Fonte: Modificado de Barros (2012).

Figura 10: Malha numérica de elementos finitos utilizada na modelagem da região. A Figura a direita mostra a intensificação dos elementos biquadráticos na região do manguezal e canais adjacentes.



Fonte: Modificado de Barros (2012).

5.2.2 Dados Batimétricos e Topográficos

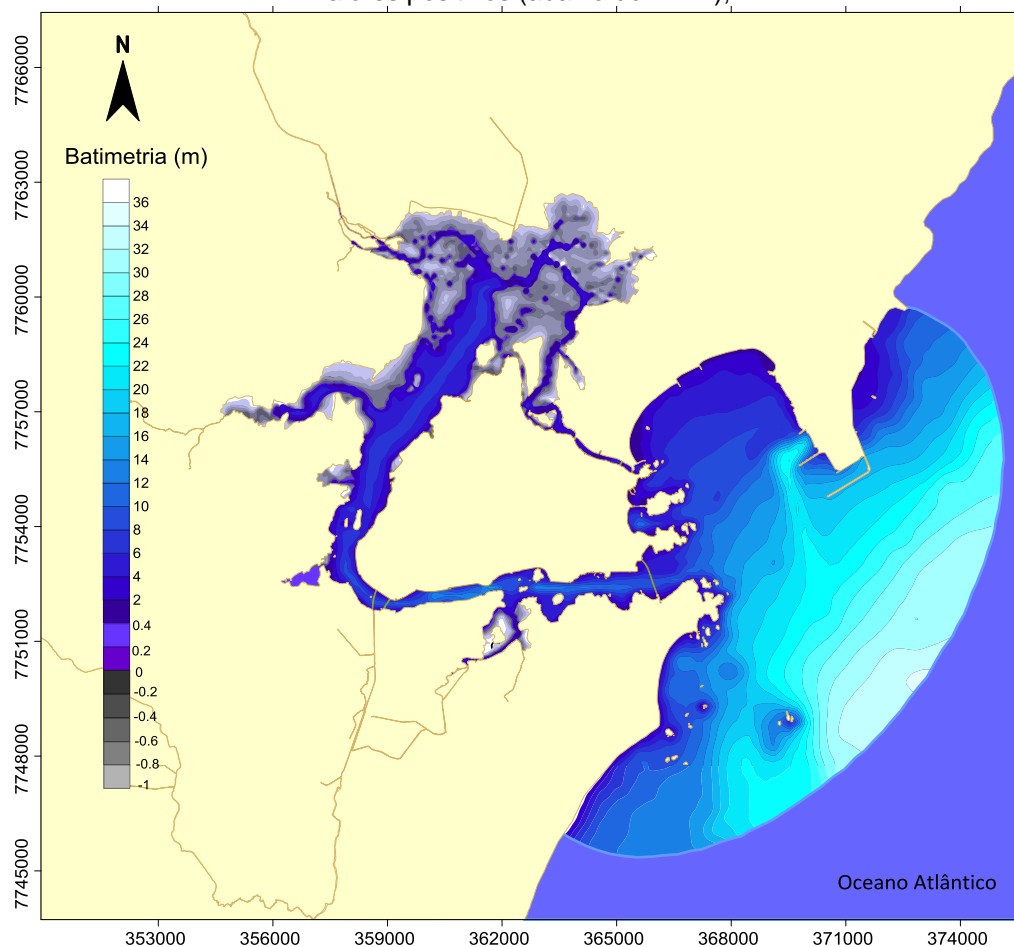
Os dados batimétricos foram provenientes de dois levantamentos em campo: um realizado por Rigo (2001) que abrangeu a região interna da Ilha de Vitória (desde a Ponte de Camburi até a Cinco Pontes) e outro realizado pelo Grupo de Estudo e Apoio aos Recursos Hídricos (GEARH) da UFES em 2002 que abrangeu a região entre a desembocadura do Rio Santa Maria até próximo à Ilha das Caieiras.

Para a parte externa do domínio, Baía do Espírito Santo, foram utilizados dados da carta náutica da Baía de Vitória, editadas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil.

Devido à ausência de dados mais precisos referentes a topografia do manguezal, bem como dos pequenos canais presentes nessa área, foram utilizados dados do Modelo Digital de Terreno (MDT), elaborado por Barros (2012) a partir da altimetria sugerida por Rigo (2004) para as planícies alagáveis de manguezal presentes na região.

A partir do Modelo Digital de Terreno (MDT), conforme ilustrada na Figura 11, percebe-se que na borda dos maiores canais localizados na região de mangue a cota topográfica fica em torno de -0,2 e -0,4 m em relação ao Nível Médio da Maré (NMM) e para as regiões mais afastadas dos canais é de aproximadamente -1,0 m em relação ao NMM. Verifica-se, então, que esta região é bastante heterogênea, possuindo profundidade variando entre cerca de 36 m até -1,0 m em relação ao NMM.

Figura 11: Batimetria das planícies de maré e isolinhas de profundidades nas regiões submersas referidos ao nível médio do mar (NMM). Valores negativos (acima do NMM) e valores positivos (abaixo do NMM),



Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.3 Condições Iniciais e de Contorno

Para a determinação da condição de fronteira aberta foram utilizadas as constantes harmônicas extraídas dos dados de elevação da superfície da água medidos na estação Tubarão para o período compreendido entre 17 de agosto de 2006 a 01 de junho de 2007, conforme exposto na Tabela 1. Essa estação foi selecionada devido ao fato de estar situada próxima ao domínio aberto. O registro de maré gerada a partir das constantes harmônicas extraídas está apresentado na Figura 12.

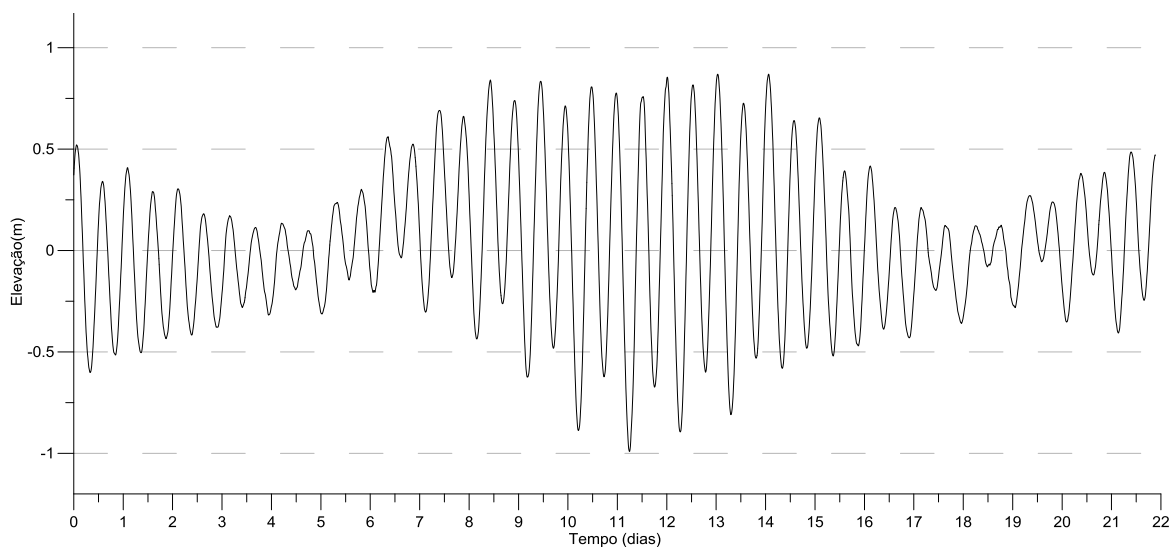
Tabela 1: Constantes harmônicas extraídas do registro de elevação da superfície da água da estação Tubarão para o período de 17 de agosto de 2006 a 01 de junho de 2007.

Constante	Periodo (s)	Amplitude (m)	Fase (grau)
Ssa	15778463,36	0,0245	131,118
MSm	2748551,513	0,0048	17,553
Mm	2380713,365	0,023	235,026
MSf	1275721,423	0,0028	301,719
Mf	1180292,344	0,0307	315,339
alpha1	104661,5988	0,0023	56,906
2Q1	100822,4008	0,0049	58,966
sigma1	100254,1951	0,0047	40,526
Q1	96726,08376	0,0261	79,366
ro1	96202,9919	0,0035	78,318
O1	92949,6301	0,0879	97,769
MP1	92405,27797	0,003	179,196
beta1	89909,11245	0,0012	133,908
M1	89399,69357	0,0022	104,981
chi1	88952,65938	0,0023	88,307
P1	86637,20483	0,016	152,775
K1	86164,09058	0,0511	161,132
phi1	85696,11549	0,0014	142,507
theta1	83545,0446	0,0006	140,062
J1	83154,51628	0,0015	295,401
SO1	80712,64078	0,0002	105,668
OO1	80301,86721	0,0018	350,461
KQ1	77681,65186	0,0009	37,077
OQ2	47384,04214	0,0011	188,044
MNS2	47258,16272	0,0074	71,042
2N2	46459,34794	0,0156	100,99
mu2	46338,32735	0,0208	93,748
N2	45570,05357	0,0729	96,382
nu2	45453,61584	0,0105	88,56
M2	44714,16431	0,4545	90,484
MKS2	44587,80812	0,002	99,383
lambda2	43998,3869	0,002	320,174
L2	43889,83274	0,0268	69,904
S2	43200,00002	0,2074	100,746
K2	43082,04529	0,059	92,675
MSN2	42430,07146	0,0031	320,212
KJ2	42316,2782	0,0042	115,931
MO3	30190,69067	0,0013	161,264
M3	29809,44289	0,0064	103,942
SO3	29492,72808	0,0006	63,393
MK3	29437,70382	0,0007	94,918
SK3	28773,74003	0,0028	208,21
MN4	22569,02603	0,004	39,986

M4	22357.08217	0,008	75,15
SN4	22176,694	0,0008	79,272
MS4	21972,02139	0,0035	137,829
MK4	21941,46719	0,0008	170,951
S4	21600	0,0009	301,433
SK4	21570,471	0,0004	350,734
2MK5	17751,16878	0,0007	55,756
2SK5	17270,54296	0,0006	283,034
2MN6	14998,622	0,0012	268,793
M6	14904,72144	0,0011	307,284
2MS6	14732,59513	0,0005	358,331
2MK6	14718,85191	0,0003	259,584
2SM6	14564,39902	0,0003	17,072
MSK6	14550,96766	0,0002	228,755
3MK7	12706,70687	0,0002	166,055
M8	11178,54108	0,0015	134,079

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 12: Registro de maré astronômica construídas a partir das constantes harmônicas extraídas dos dados de elevação da superfície de água da Estação Tubarão para 17/08/2006 a 23/08/2006.

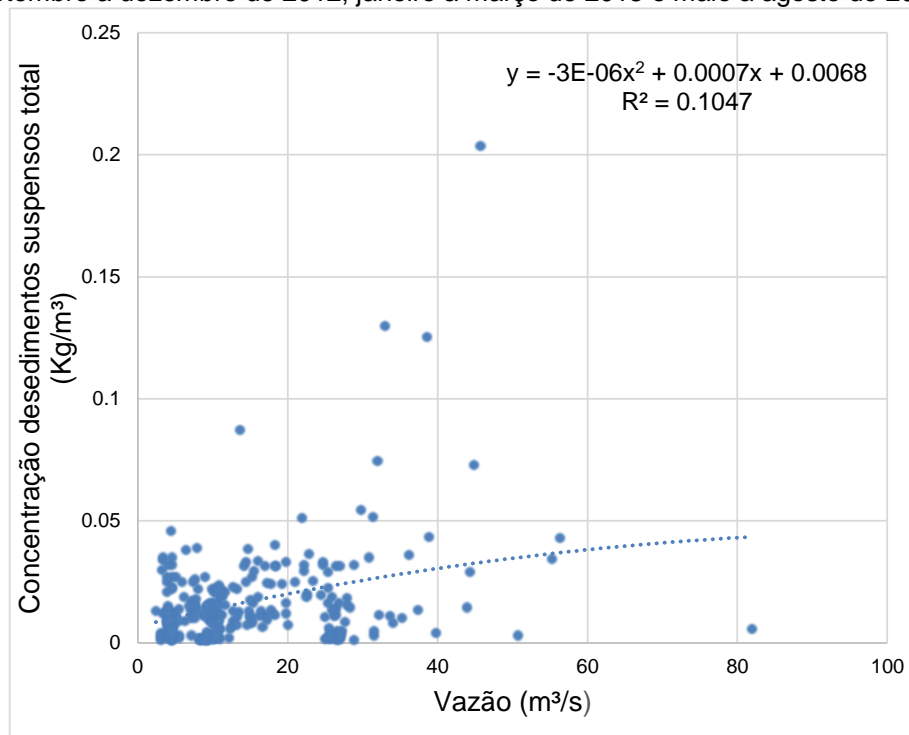


Fonte: Elaborado pela autora.

Além disso, para a determinação da condição de fronteira aberta do rio, foram adotadas medidas de vazões diárias para o Rio Santa Maria da Vitória em diferentes regimes fluviais (cheia e estiagem). A escolha do período das vazões diárias adotadas nesse trabalho esteve relacionada com a coexistência de medidas *in situ* de concentração de sedimentos suspensos. Dessa forma, devido à baixa correlação apresentada entre os dados de vazão e

concentração de sedimentos suspensos registradas para esta estação, conforme apresentado na Figura 13.

Figura 13: Correlação entre vazão e concentração de sedimentos suspensos total para o Rio Santa Maria da Vitória dos dados provenientes da estação Jusante Suíça entre o período de setembro a dezembro de 2012, janeiro a março de 2013 e maio a agosto de 2015.

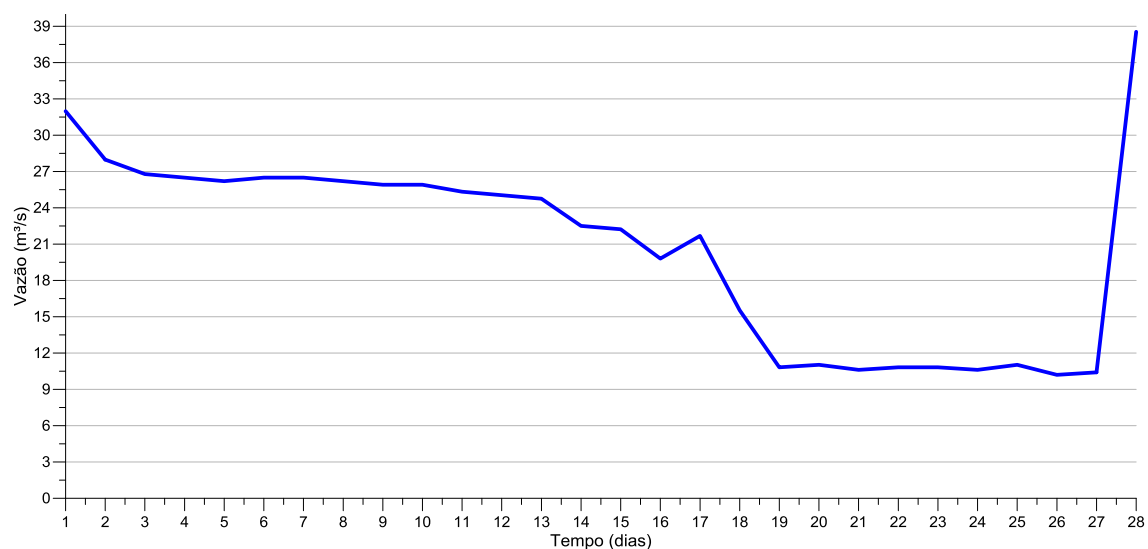


Fonte: Elaborado pela autora.

Medeiros *et al.* (2011), associa a baixa correlação apresentada entre o aporte de material em suspensão no baixo Rio São Francisco (SE/AL), em diferentes condições hidrológicas, aos impactos causados no regime hidrológico decorrente da construção das barragens em cascatas ao longo da seção longitudinal do rio, responsável por alterar a dinâmica do transporte dos sedimentos suspensos. Portanto, analogamente, como o Rio Santa Maria da Vitória também possui um fluxo controlado pela captação de águas urbanas de um reservatório à montante do seu curso d'água, nenhuma relação clara deveria ser esperada entre descarga fluvial e concentração de sedimentos suspensos. Assim, os períodos escolhidos em que coexistiam dados de vazão e concentração de sedimentos suspensos, fevereiro de 2013 – período de cheia e agosto de 2015 – período de estiagem, encontram-se ilustrados na Figura 14 e na Figura 15, fornecidos por Rampinelli (2013) e Guimarães (2016), respectivamente, ambas coletadas na estação fluviométrica PCH Jusante

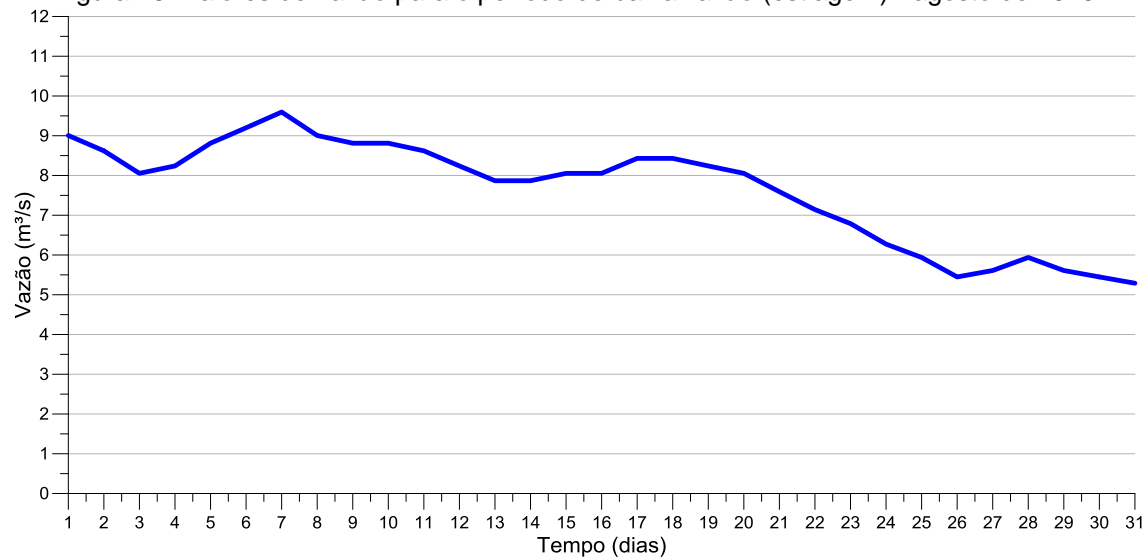
Suíça. E na Tabela 2 e Tabela 3 encontra-se os dados de concentração de sedimentos suspensos utilizados para o período de cheia e de estiagem, respectivamente.

Figura 14: Valores de vazão para o período de alta vazão (cheia) - fevereiro de 2013.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 15: Valores de vazão para o período de baixa vazão (estiagem) - agosto de 2015.



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 2: Dados de concentração de sedimentos suspensos para o período de cheia – fevereiro de 2013.

conc. da classe silte grosso (kg/m ³)	conc. da classe areia muito fina (kg/m ³)
0,5837075	0,110558
0,1214425	0,023002
0,1292775	0,024486
0,2468025	0,046746
0,086185	0,016324
0,0901025	0,017066
0,10969	0,020776
0,10969	0,020776
0,1057725	0,020034
0,148865	0,028196
0,1762875	0,03339
0,0822675	0,015582
0,258555	0,048972
0,148865	0,028196
0,25072	0,047488
0,09402	0,017808
0,133195	0,025228
0,2311325	0,043778
0,0430925	0,008162
0,164535	0,031164
0,1567	0,02968
0,1762875	0,03339
0,0195875	0,00371
0,1567	0,02968
0,0430925	0,008162
0,0587625	0,01113
0,03134	0,005936
0,9832925	0,186242

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 3: Dados de concentração de sedimentos suspensos para o período de estiagem – agosto de 2015.

conc. da classe silte grosso (kg/m ³)	conc da classe areia muito fina (kg/m ³)
0,039175	0,00742
0,04701	0,008904
0,007835	0,001484
0,039175	0,00742
0,023505	0,004452
0,03134	0,005936
0,17237	0,032648
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0,023505	0,004452
0,023505	0,004452
0	0
0,03134	0,005936
0	0
0,007835	0,001484
0	0
0	0
0,023505	0,004452

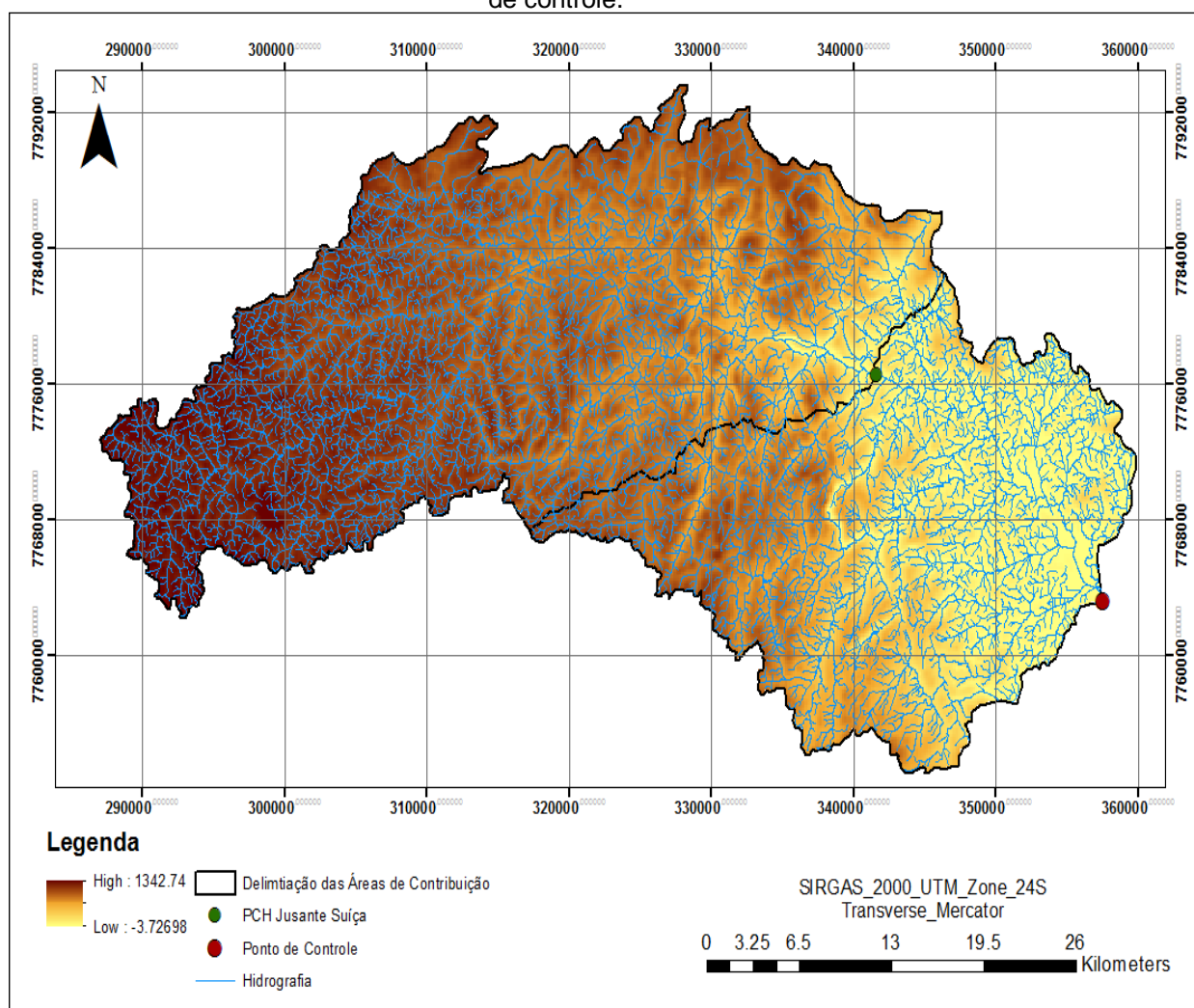
Fonte: Elaborado pela autora.

Devido à inexistência de dados fluviométricos próximos ao contorno aberto do rio definido no domínio, foi necessário recorrer ao método de regionalização de vazões para os dados apresentados acima, a qual a área drenada pela estação PCH Jusante Suíça apresentou características similares à da área estudada. Para esse estudo, foi empregado o indicador regional que utiliza o conceito de descarga específica ($\text{L/s}^{-1}.\text{km}^{-2}$) proposto por Tucci (2002). Segundo o autor,

conhecendo-se a área de drenagem associada a uma estação de monitoramento fluviométrico é possível estimar/preencher a vazão faltante para o ponto de controle.

As delimitações das sub-bacias para a aplicação do método da regionalização da vazão foram obtidas a partir do Modelo Digital de Terreno elaborado em ambiente SIG (*Arcgis* 10.1) a partir das feições “relevo” e “hidrografia” extraídas do site GEOBASES¹ para a área em estudo. Por fim, as suas respectivas áreas foram extraídas dos *Shapes Files*, conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16: Mapa de correlação entre áreas de contribuições para estimativa da vazão no ponto de controle.



Fonte: Elaborado pela autora.

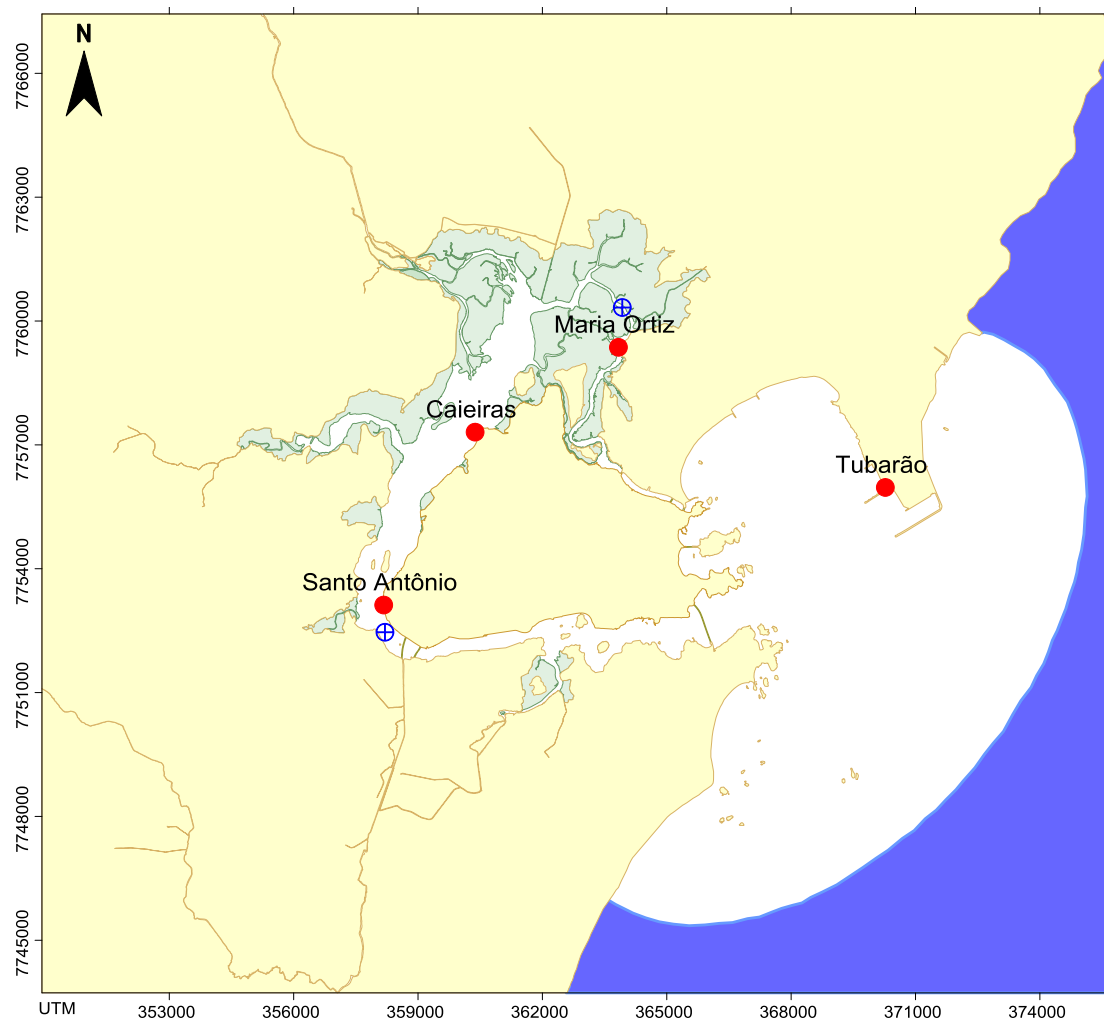
¹<http://www.geobases.es.gov.br/publico/AcessoNavegador.aspx?id=142&nome=NAVEGADOR>
GEOBASES

As condições iniciais consideradas em toda malha encontram-se em situações de preamar, com nível d'água uniforme e velocidades nulas em todo o domínio (partida a frio). Adotou-se o período de 30 dias de simulação para abranger o período de quadratura e sizígia, com o passo de tempo de 10 segundos.

5.2.4 Dados Primários (Maré e Corrente): Calibração do Modelo Hidrodinâmico

A calibração do modelo consistiu na comparação entre os dados medidos e simulados para a elevação da superfície livre (maré) e entre os dados de velocidade das correntes. Desta forma, foram criadas 4 estações de monitoramento dentro do domínio modelado, denominadas “estações maregráficas”, sendo elas: Tubarão, Santo Antônio, Ilha das Caieiras e Maria Ortiz e para as “estações correntógrafas” foram utilizados dados medidos apenas da estação Santo Antônio e Maria Ortiz. As estações foram situadas em posições equivalentes aos pontos coletados dos dados medidos (Figura 17). Os dados de elevação dos níveis de água e correntes utilizados para a calibração foram fornecidos pelo GEARH/UFES e estes estão compreendidos no período entre 27 de agosto ao dia 6 de setembro de 2002.

Figura 17: Mapa de localização das estações monitoradas.



Legenda: símbolos em azul indicam as posições das estações de medições de magnitude da corrente e símbolos em vermelho as das estações de medições da elevação do nível da água.

Fonte: Modificado de Barros (2012).

5.2.5 Rugosidade Equivalente de Fundo

A rugosidade equivalente do fundo (k_s) é um parâmetro importante, pois é responsável pelo cálculo das tensões de fundo e é o principal parâmetro ajustável responsável pela calibração das tensões turbulentas verticais. Desta forma, as tensões geradas pelo atrito de fundo, calculadas utilizando (k_s), são conhecidas a partir da determinação do coeficiente de Chézy.

Como a composição do fundo dos canais principais e dos manguezais adjacentes geralmente não são conhecidos, neste trabalho foram utilizados os valores sugeridos por Abbot e Basco (1989, *apud* ROSMAN, 2014). Na Figura

18Figura 18 estão apresentados valores sugeridos para esse parâmetro de acordo com a composição do fundo local.

Figura 18: Valores sugeridos para a amplitude efetiva da rugosidade do fundo, ϵ , sem efeitos de ondas, para uso no módulo 2 DH do modelo FIST3D.

Leito de sedimentos com rugas e similares	
Predominância de siltes e finos	$0.0001\text{m} < \epsilon < 0.0100\text{m}$
Predominância de areias finas	$0.0070\text{m} < \epsilon < 0.0150\text{m}$
Predominância de areias médias	$0.0100\text{m} < \epsilon < 0.0300\text{m}$
Predominância de areias grossas	$0.0250\text{m} < \epsilon < 0.0500\text{m}$
Predominância de areias muito grossas	$0.0400\text{m} < \epsilon < 0.0800\text{m}$
Predominância de areias com cascalho	$0.0500\text{m} < \epsilon < 0.1200\text{m}$
Sedimentos com vegetação	$0.0500\text{m} < \epsilon < 0.1500\text{m}$
Sedimentos com obstáculos (e.g. pedras, troncos)	$0.1500\text{m} < \epsilon < 0.4000\text{m}$
Fundo de pedra ou rochoso	
Fundo de alvenaria	$0.0003\text{m} < \epsilon < 0.0010\text{m}$
Fundo de pedra lisa	$0.0010\text{m} < \epsilon < 0.0030\text{m}$
Fundo de asfalto ou similar	$0.0030\text{m} < \epsilon < 0.0070\text{m}$
Fundo com pedregulho ($d_{50} < 3\text{ cm}$)	$0.0070\text{m} < \epsilon < 0.0150\text{m}$
Fundo com pedras médias ($d_{50} < 8\text{ cm}$)	$0.0150\text{m} < \epsilon < 0.0400\text{m}$
Fundo com pedras ($d_{50} < 20\text{ cm}$)	$0.0400\text{m} < \epsilon < 0.1000\text{m}$
Fundo com rochas ($d_{50} < 50\text{ cm}$)	$0.1000\text{m} < \epsilon < 0.2500\text{m}$
Fundo de Concreto:	
Fundo de concreto liso	$0.0001\text{m} < \epsilon < 0.0005\text{m}$
Fundo de concreto inacabado	$0.0005\text{m} < \epsilon < 0.0030\text{m}$
Fundo de concreto antigo	$0.0030\text{m} < \epsilon < 0.0100\text{m}$

Valores menores para fundos muito lisos e maiores para fundos muito rugosos podem ser adotados.

Fonte: Abbot e Basco (1989 *apud* ROSMAN, 2014).

Após alguns testes verificou-se que valores de rugosidade equivalente do fundo () compreendidos entre 0,005 e 0,02 m no geral não provocaram significativa diferença entre os resultados medidos e simulados das velocidades das correntes e nos níveis da água. Desta forma, para os canais principais estudados nesse trabalho, adotou-se o valor de 0,01 m para a rugosidade equivalente do fundo (). Para representar os efeitos do atrito das raízes das árvores na região do manguezal, utilizou-se o valor de 0,1 m após verificar que este valor foi o que melhor representou o ajuste hidrodinâmico entre os dados medidos e simulados em regiões alagáveis.

5.2.6 Parâmetros Relacionados ao Processo de Alagamento e Secamento

A avaliação desses parâmetros parte do princípio que os resultados da modelagem hidrodinâmica obtidos utilizando o Método Poroso Rugoso são sensíveis aos diferentes parâmetros estabelecidos na formulação do método, sendo eles: Espessura da camada porosa-rugosa (), Fator de rugosidade () e Fator de aceleração da celeridade da onda (). Rosman (2014) apresenta faixa de valores recomendados para estes parâmetros conforme apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Faixa de valores recomendados para os parâmetros ao processo de alagamento e secamento.

Espessura da camada rugosa porosa - (m)	Fator de rugosidade (Fator de aceleração da celeridade da onda
5 a 15% da oscilação dos níveis de água	1,0 a 5,0 vezes a	1,0 a 2,0

Fonte: Extraído de Rosman (2014).

Com a finalidade de representar as regiões alagáveis deste estudo, foram empreendidas simulações hidrodinâmica baseado nos parâmetros apresentados na Tabela 4. Os valores que apresentaram estabilidade numérica para estes parâmetros e que foram utilizados são: $m_r = 1,0$ e $\alpha = 1,0$.

5.2.7 Análise Estatística para Validação do Modelo Hidrodinâmico

Para a validação dos resultados da elevação da superfície da água foi empregado um método estatístico que permite quantificar o quanto esses resultados se aproximam dos dados medidos em campo. O método estatístico escolhido foi o índice de concordância de Wilmott (Id), esse índice mede a capacidade do modelo de reproduzir de forma satisfatória os dados medidos em campo, conforme Equação 20. De acordo com Wilmott (1981) o Id pode variar de 0 a 1, de modo que quanto mais próximo a 1 os dados apresentam melhor concordância.

(20)

Onde \hat{y}_t é a variável modelada, y_t é a variável observada, \bar{y} sua média no tempo e N é o número de dados medidos.

Para a validação dos dados de correntes foram utilizados a média relativa absoluta (“Relative Mean Absolut Error – RMAE”), como mostrado na Equação 21. De acordo com van Rijn *et al.* (2003) o emprego desse método estatístico é melhor aplicado do que a média relativa do erro quadrático (“Relative Mean Square Error – RMSE”), isso porque os erros são corrigidos dos erros de medição e seu valor pode ser obtido de acordo com a seguinte formulação:

(21)

Onde E é o erro absoluto médio entre os dados medidos em campo (E) e os dados fornecidos pelo modelo (S), σ é o erro associado às medidas de velocidade do equipamento, o qual é igual a 0,05 m/s e \bar{y} é a média dos valores absolutos observados em campo. van Rijn *et al.* (2003) atribuíram valores a eficiência da simulação, conforme mostra a Tabela 5.

Tabela 5: Qualidade dos resultados simulados com base no índice RMAE para as velocidades.

Qualidade	RMAE
Excelente	< 0,1
Bom	0,1 - 0,3
Razoável	0,3 - 0,5
Pobre	0,5 - 0,7
Ruim	> 0,7

Fonte: van Rijn *et al.* (2003).

5.3 MODELAGEM DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO

A simulação do transporte de sedimentos em suspensão foi realizada utilizando o Modelo de Transporte Lagrangeano Determinístico contido no SisBaHia[®]. Este modelo permite a determinação de tendências de deriva de sedimentos, substâncias particuladas flutuantes ou dissolvidas e a determinação de correntes residuais lagrangeanas.

O transporte de sedimentos pode ocorrer em suspensão e por arrasto junto ao leito. Segundo van Rijn (1987), a natureza do transporte depende do tamanho, peso específico das partículas e formato, além das condições hidrodinâmicas locais como turbulência e velocidade. Em condições naturais o limite entre transporte em suspensão e por arrasto, ou pelo leito, não é bem definido, neste caso, é necessária uma definição de cada tipo para possibilitar a seleção da fórmula adequada.

Em geral, o Modelo de Transporte Lagrangeano lança partículas na região da fonte em intervalos de tempos regulares. Estas partículas são dispostas na região da fonte aleatoriamente e advectadas pelas correntes computadas através do Modelo Hidrodinâmico.

Desta forma, definiu-se uma fonte de formato retangular para o lançamento pontual de 10 partículas a cada passo de tempo (100 segundos), a uma profundidade de 1 metro acima ao nível do fundo. O mesmo procedimento foi utilizado para ambos os regimes fluviais (cheia e estiagem).

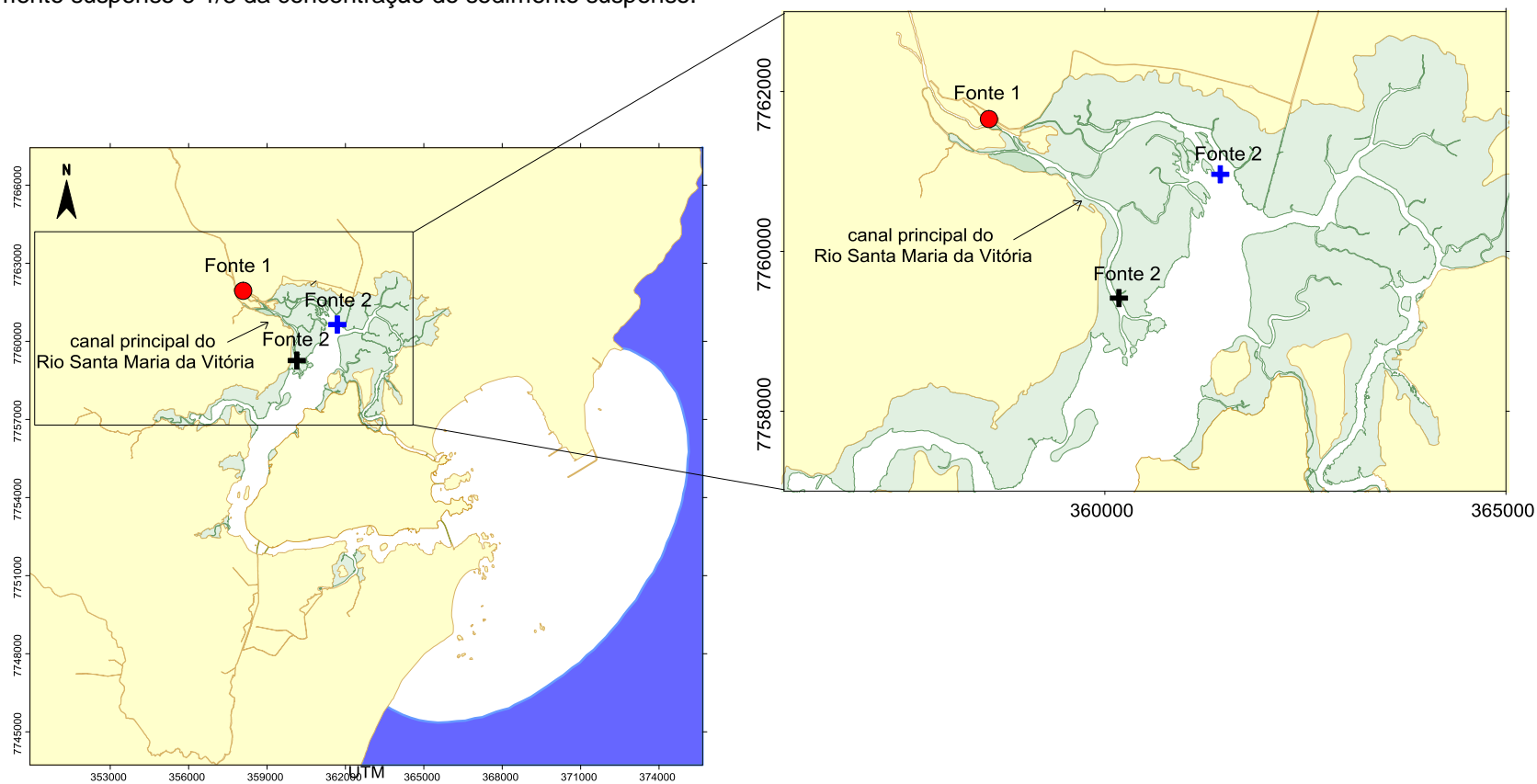
Para a escolha do posicionamento da fonte no domínio, foi considerada uma região significativamente longe do contorno aberto, a fim de cumprir a exigência da condição de contorno imposta pelo Modelo de Transporte Lagrangeano, de modo com que as partículas, ao deixarem o domínio, não causem perdas sensíveis para o problema simulado. Além disso, não foi considerada a absorção de massa da partícula pelas fronteiras fechadas do domínio, de forma que as partículas que atingirem a fronteira retornem ao meio sem sofrer qualquer perda.

Para a avaliação da distribuição da zona de sedimentação dos sólidos suspensos provenientes do Rio Santa Maria da Vitória ao longo da Baía de

Vitória foram analisados dois cenários distintos. Estes cenários levaram em consideração duas fontes de lançamentos pontuais distintas situadas em diferentes posições na baía, conforme pode ser verificado na Figura 19.

Como pode ser verificado na figura, a primeira fonte foi posicionada em uma seção à montante do rio, enquanto a segunda fonte foi dividida em duas partes. A primeira parte da fonte foi situada em uma seção do canal principal do rio a jusante das planícies de maré presentes nos entornos do Rio Santa Maria da Vitória e recebeu o aporte de $\frac{2}{3}$ (dois terços) da concentração do material suspensos (símbolo preto na Figura 19). A segunda parte da fonte foi situada em uma região de contribuição sedimentar para a baía proveniente dos canais adjacentes ao canal do rio principal, recebendo $\frac{1}{3}$ (um terço) dessa.

Figura 19: Localização das fontes de lançamentos pontuais do Rio Santa Maria da Vitória ao longo da Baía de Vitória. O símbolo em vermelho representa a localização da primeira fonte, enquanto os símbolos em preto e azul para a segunda fonte representam despejos, respectivamente, de 2/3 da concentração do sedimento suspenso e 1/3 da concentração do sedimento suspenso.



Fonte: Elaborado pela autora.

5.3.1 Determinação dos Parâmetros da Fonte

5.3.1.1 Concentração efluente dos sedimentos suspensos

Os dados diários de concentração de sedimentos suspensos utilizados para o período estudado foram extraídos de Rampinelli (2013) e Guimarães (2016), ambos coletados na estação Jusante Suíça. No entanto, a fim de separar as diferentes classes granulométricas, bem como a porcentagens destas classes presentes neste material, recorreu-se a um trabalho de análise granulométrica realizada na mesma estação pela EDP – Escelsa (Espírito Santo Centrais Elétricas S.A.). Estes dados foram fornecidos pelo GEARH e encontram-se expostos na Tabela 6.

Tabela 6: Análise granulométrica da estação Jusante Suíça.

Amostra	Data	Silte grosso (%)	Areia muito fina (%)	Areia fina (%)	Areia média (%)
0	15/03/2013	85,61	8,59	5,80	0,00
1	21/06/2013	100,00	0,00	0,00	0,00
2	20/09/2013	55,39	44,61	0,00	0,00
3	04/12/2013	79,15	20,85	0,00	0,00
4	03/04/2014	98,31	1,69	0,00	0,00
5	15/07/2014	100,00	0,00	0,00	0,00
6	16/10/2014	100,00	0,00	0,00	0,00
7	04/12/2014	79,15	20,85	0,00	0,00
8	10/12/2014	7,50	37,00	37,00	18,50
Média		78,35 %	14,84 %	4,76 %	2,06 %

Fonte: EDP Escelsa

Desconsiderando a presença de mecanismos de “armadilhagens” para retenção do transporte destes sedimentos ao longo do curso d’água até a sua chegada à fonte e a baixa variabilidade no fornecimento de sedimento pela bacia, pode-se considerar que a porcentagem média apresentada por cada classe granulométrica é constante neste ambiente. No entanto, para o presente trabalho analisou-se apenas a distribuição sedimentar das classes silte grosso e areia muito fina devido essas classes granulométricas serem as mais significativas no material.

5.3.1.2 Vazão efluente na fonte

A determinação da vazão efluente diária de cada classe granulométrica foi definida a partir da concentração efluente de sedimentos suspensos contida em cada fração granulométrica dividida pela densidade do quartzo (2650 kg/m^3), mineral esse predominante neste tipo de ambiente.

A vazão efluente (m^3/s) multiplicada pela concentração efluente (kg/m^3) resultará na carga efluente lançada na fonte (kg/s). Desta forma, para todo o período de cheia (fevereiro de 2013) foi imposta na condição de contorno 1946 kg para a classe silte e de $69,81 \text{ kg}$ para a classe areia muito fina. No entanto, para todo o período de estiagem (agosto de 2015) foi imposta na condição de contorno $12,4 \text{ kg}$ para a classe silte e $0,422 \text{ kg}$ para a classe areia muito fina.

5.3.1.3 Velocidade de sedimentação das partículas suspensas

Ao se tratar da estimativa da velocidade de sedimentação para os sedimentos de pequeno diâmetro, a predominância das forças viscosas faz com que as forças aceleradoras e de resistência sejam proporcionais à 1ª potência da velocidade. Neste caso, a velocidade de sedimentação poderá ser calculada empregando-se a Equação 22, também conhecida como Lei de Stokes, em função do diâmetro da partícula para densidade dessas de 2.650 kg/m^3 e para número de Reynolds menores do que 1.

$$\text{---} \quad (22)$$

Onde v é a velocidade de deposição da esfera (m/s); ρ_s é a densidade da esfera em (kg/m^3); ρ_f é a densidade do fluido em (kg/m^3); μ é a viscosidade do fluido (kg/m.s); d é o diâmetro da esfera (m) e g a aceleração da gravidade (m/s^2). Na Tabela 7 é apresentada a classificação dos minerais quanto ao diâmetro da esfera granulométrica utilizada como referência.

Tabela 7: Classificação dos sedimentos segundo a granulometria.

Intervalo granulométrico (mm)	Classificação nominal			
	Proposição original (inglês)		Tradução usual (português)	
>256	Gravel	Boulder	Cascalho (ou balastro em Portugal)	Matacão
256 - 64		Cobble		Bloco ou calhau
64 - 4,0		Pebble		Seixo
4,0 - 2,0		Granule		Grânulo
2,0 - 1,0	Sand	Very coarse sand	Areia	Areia muito grossa
1,0 - 0,50		Coarse sand		Areia grossa
0,50 - 0,250		Medium sand		Areia média
0,250 - 0,125		Fine sand		Areia fina
0,125 - 0,062	Silt	Very fine sand	Silte	Areia muito fina
0,062 - 0,031		Coarse silt		Silte grosso
0,031 - 0,016		Medium silt		Silte médio
0,016 - 0,008		Fine silt		Silte fino
0,008 - 0,004	Clay	Very fine silt	Argila	Silte muito fino
<0,004		Clay		Argila

Fonte: Wilson e Taioli (2000).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo tem-se a intenção de discutir os resultados alcançados para as etapas propostas nos objetivos secundários, quais sejam: calibração do modelo hidrodinâmico, considerando a elevação da superfície de água e da corrente de maré em um estuário barotrópico idealizado; avaliação do comportamento das planícies de maré na distribuição dos sedimentos suspensos transportados e avaliação da competência de uma vazão fluvial e da carga de sedimento carregada por essa em um período de cheia e outro de estiagem ao longo do estuário.

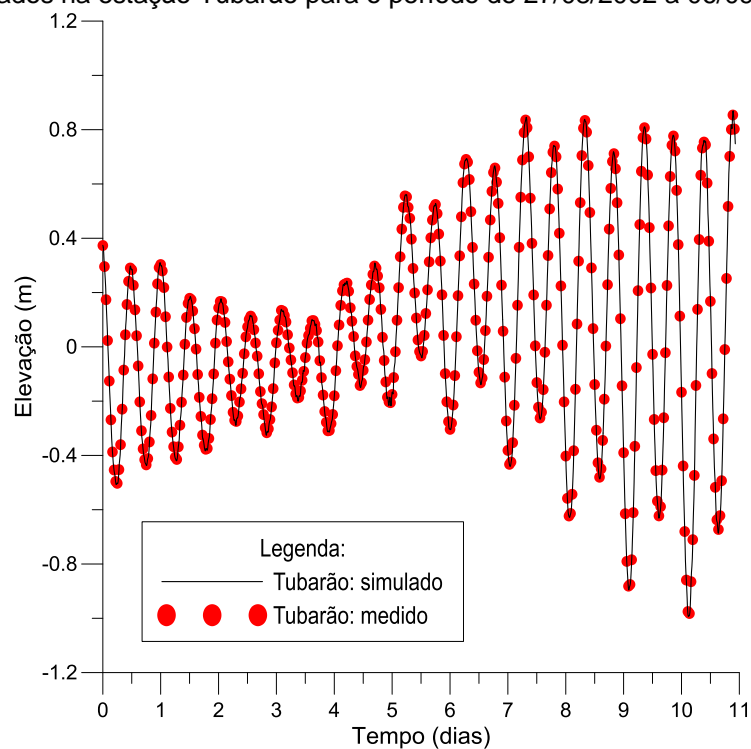
6.1 CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

A calibração do modelo hidrodinâmico irá comparar os dados de elevação da superfície da água e de correntes obtidos pelo modelo com os dados medidos em campo nas estações monitoradas ao longo da Baía de Vitória.

6.1.1 A Maré

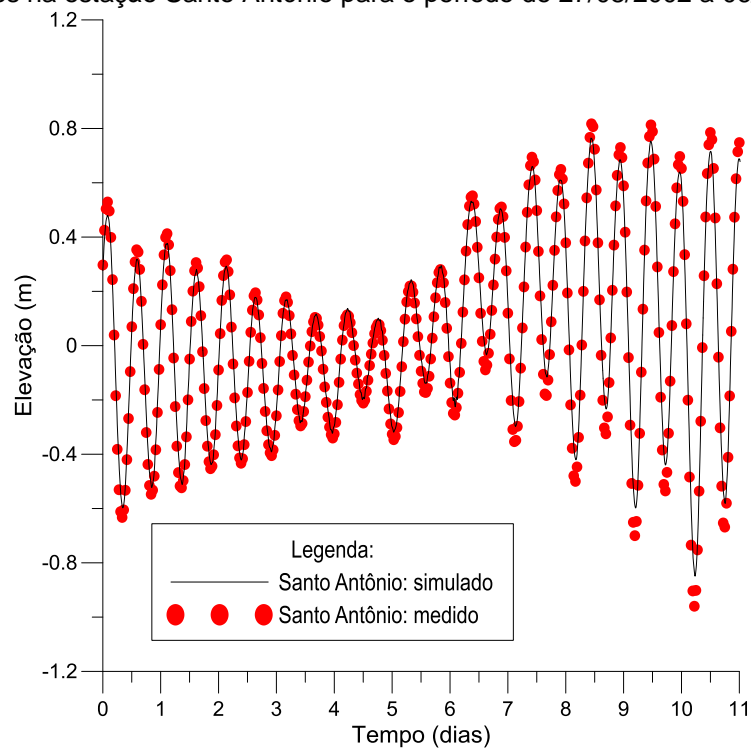
Uma avaliação qualitativa primária do desempenho do modelo na simulação da elevação da superfície da água pode ser realizada através da comparação entre os dados simulados e medidos nas estações monitoradas ao longo da baía, conforme ilustrada na Figura 20, na Figura 21, na Figura 22 e na Figura 23.

Figura 20: Comparação entre os dados de elevação da superfície da água medidos e simulados na estação Tubarão para o período de 27/08/2002 a 06/09/2002.



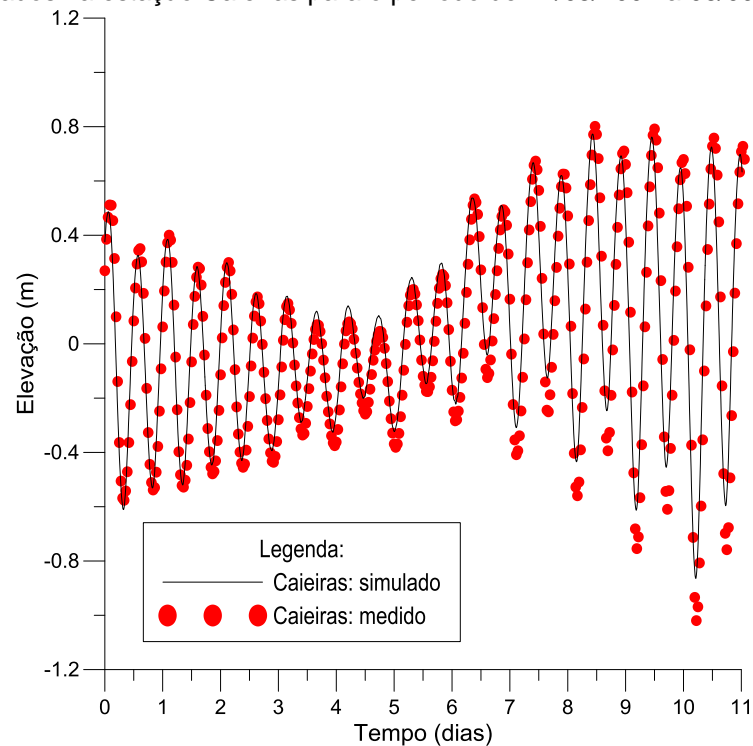
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 21: Comparação entre os dados de elevação da superfície da água medidos e simulados na estação Santo Antônio para o período de 27/08/2002 a 06/09/2002.



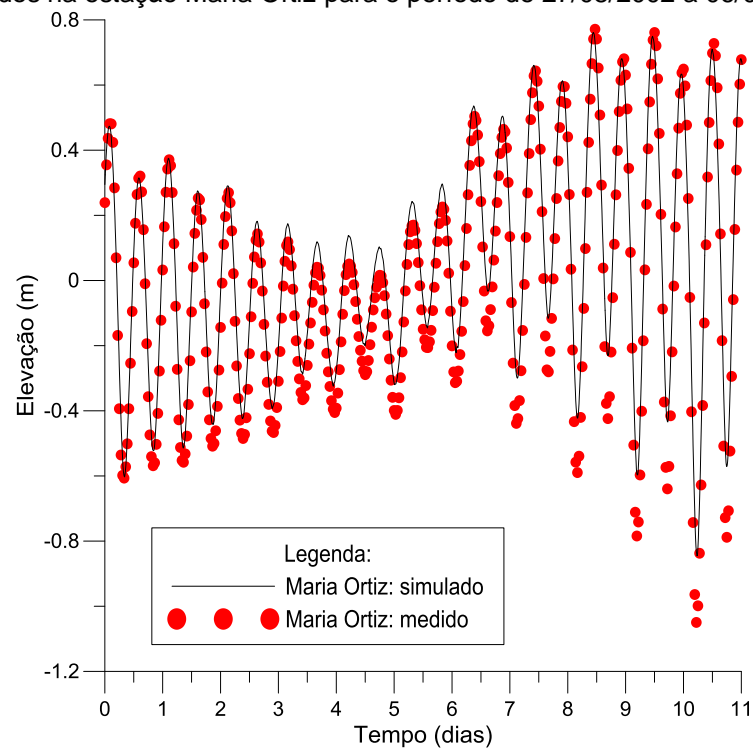
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 22: Comparação entre os dados de elevação da superfície da água medidos e simulados na estação Caieiras para o período de 27/08/2002 a 06/09/2002.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 23: Comparação entre os dados de elevação da superfície da água medidos e simulados na estação Maria Ortiz para o período de 27/08/2002 a 06/09/2002.



Fonte: Elaborado pela autora.

De forma geral, a comparação visual entre os dados simulados e medidos apresentaram uma correlação satisfatória para todas as estações. No entanto, para permitir uma melhor quantificação do desempenho do modelo na simulação da hidrodinâmica do sistema estuarino da Baía de Vitória (ES), uma análise quantitativa entre os dados foi empregada.

Desta forma, conforme descrito no Capítulo dos Materiais e Métodos, o índice de concordância de Wilmott (id) quanto mais próximo a 1 apresenta melhor concordância entre os dados simulados e medidos. Portanto, como apresentado na Tabela 8 o erro médio para a elevação da superfície da água para todas as estações monitorada apresentou concordância satisfatória.

Tabela 8: Erro médio da elevação da superfície da água para as estações monitoradas.

Estação	Índice de concordância de Wilmott (id)
Tubarão	0,999
Santo Antônio	0,999
Caieiras	0,999
Maria Ortiz	0,998

Fonte: Elaborado pelo Autor.

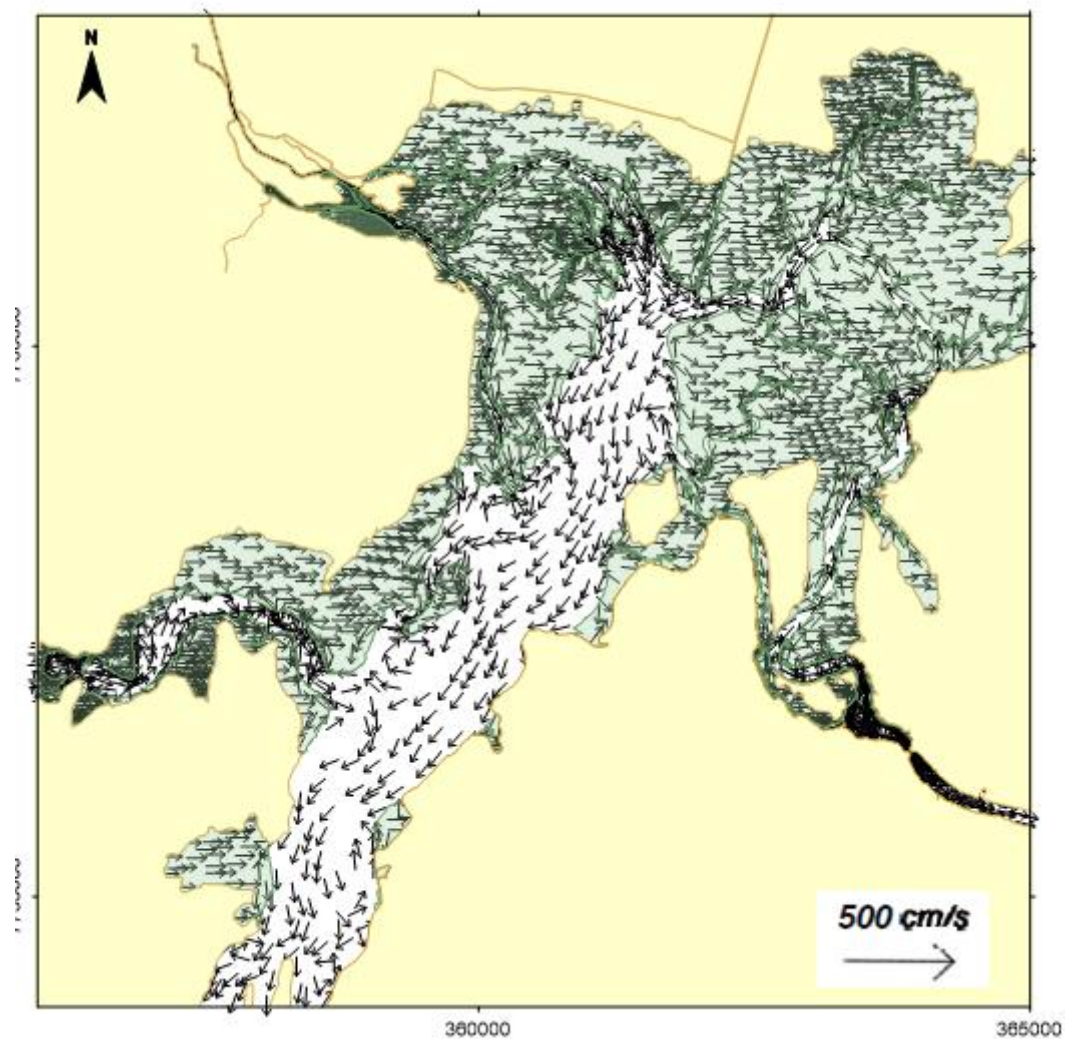
6.1.2 As Correntes de maré

Do ponto de vista das correntes, a dominância de um ciclo de maré é considerada “de vazante” quando as maiores velocidades são na vazante e “de enchente” quando as maiores velocidades são na enchente (FRIEDRICHS & AUBREY, 1988).

Ao analisar a influência do manguezal na Baía de Vitória, Rigo (2004), verificou que a lenta troca de água entre o canal e o mangue na maré alta é responsável por ocasionar uma enchente mais longa e uma vazante relativamente mais curta, caracterizando assim esse ambiente como sendo de vazante dominante. Desta forma, o campo vetorial da velocidade residual resultante gerado pelo modelo ao longo de todo o período de calibração (Figura 24) confirmam o padrão observado nos campos da velocidade instantânea relatadas por Rigo (2004), onde é possível observar que os vetores de velocidade apontam das planícies de maré em direção aos canais centrais. Além disso, as magnitudes

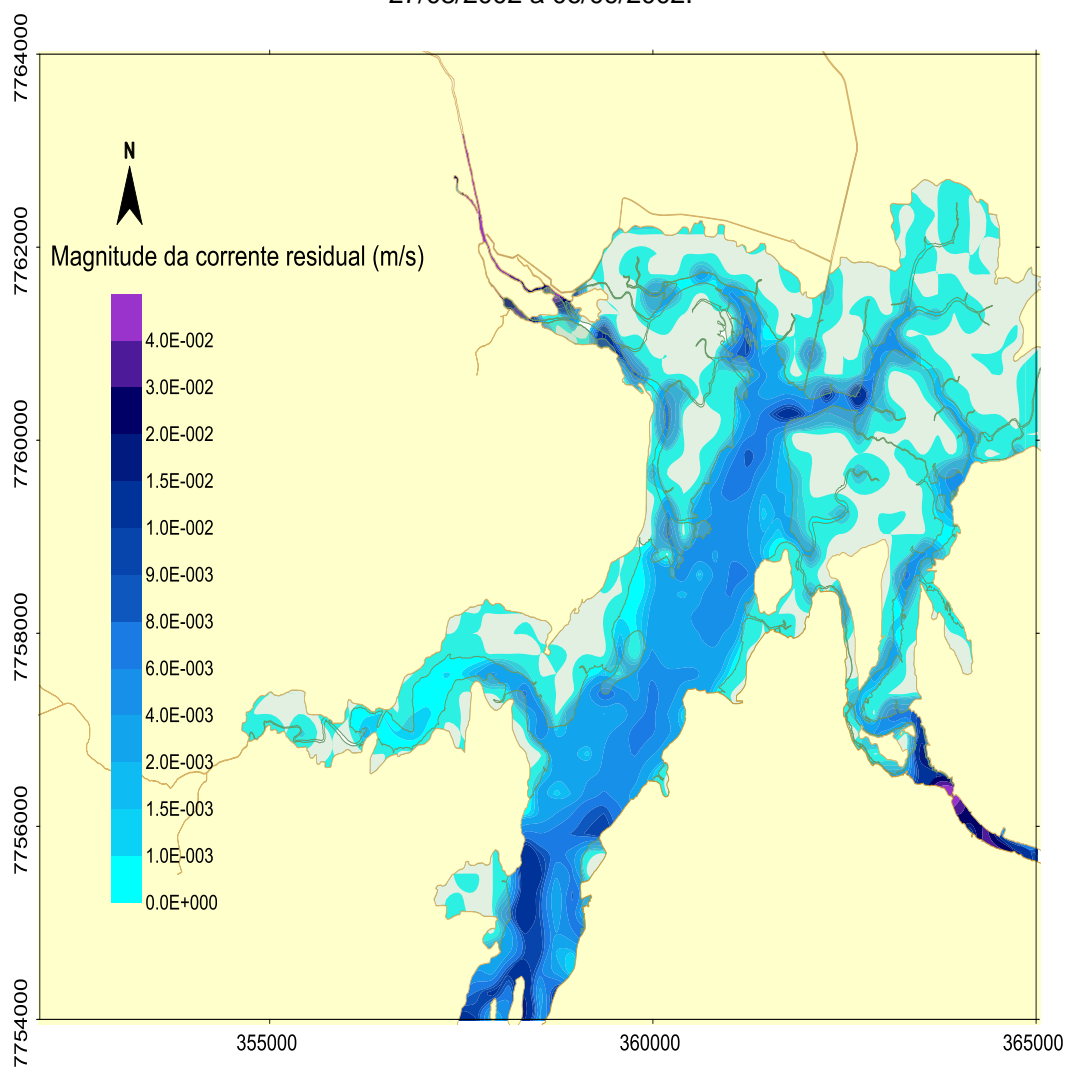
da velocidade nos canais centrais são significativamente maiores do que as das planícies de maré adjacentes, conforme ilustra a Figura 25.

Figura 24: Campo vetorial da velocidade residual para o período de 27/08/2002 a 06/09/2002.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 25: Isolinhas da magnitude da velocidade da corrente residual para o período de 27/08/2002 a 06/09/2002.



Fonte: Elaborado pela autora.

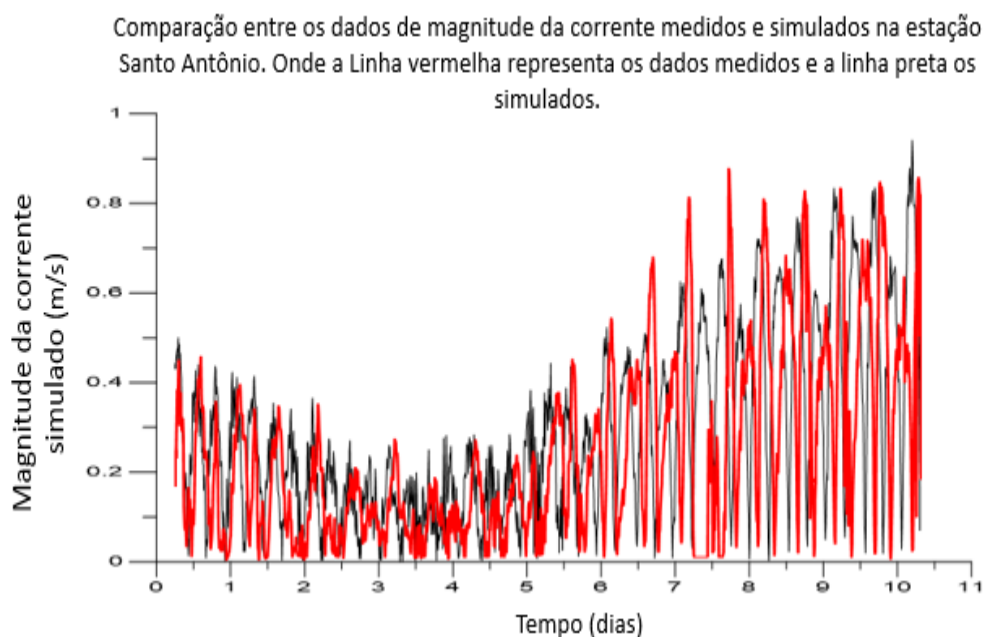
Portanto, uma vez que a dominância da corrente local é influenciada pela assimetria da maré decorrente da presença de mangue, essa também pode interferir diretamente nos processos associados, tal como ser responsável por uma maior/menor exportação de sedimentos ao longo da baía (DRONKERS, 1986; WOLANSKI *et al.*, 1990).

A análise qualitativa da comparação entre os dados simulados e medidos para a magnitude das correntes é mostrada na Figura 26 e na Figura 27 para a estação Santo Antônio e Maria Ortiz, respectivamente. Nota-se, de um modo geral, que a correlação apresentada para a estação Santo Antônio apresentou concordância no comportamento entre os dados medidos e simulados. No

entanto, os dados apresentaram uma leve diferença de fase entre eles. Já a estação Maria Ortiz, apresentou bastante dificuldade na representação dos dados de corrente local.

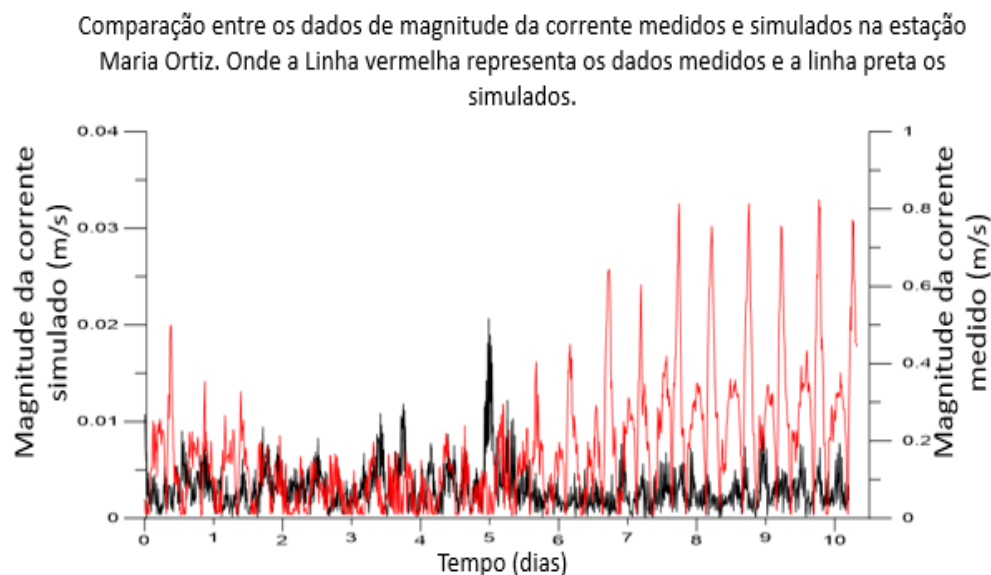
Vale ressaltar que a partir da estação Santo Antônio há a intensificação da assimetria da maré diretamente associada ao aumento da influência das áreas de mangue. Desta forma, à ausência de dados mais consistentes de topografia e rugosidade para a representação destas regiões alagáveis, segundo Aucan & Ridd (2000), pode inserir erros e imprecisões na simulação das estações localizadas próximas a essas. Além disso, a maior dificuldade encontrada na calibração da estação Maria Ortiz pode estar associada ao fato de o domínio no canal dessa região ser composta por apenas um elemento da malha, o que pode ter dificultado a representação das características nesse local.

Figura 26: Comparação entre os dados de magnitude de corrente medidos e simulados na estação Santo Antônio.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 27: Comparação entre os dados de magnitude da corrente medidos e simulados na estação Maria Ortiz.



Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme detalhado no Capítulo Materiais e Métodos no tópico 6.2.7 a média relativa do erro absoluto (RMAE) informa a qualidade da eficiência da simulação na reprodução dos dados de correntes. Dessa forma, de acordo com os valores proposto para a eficiência da simulação por van Rijn *et al.* (2003) pode-se concluir que a qualidade dos resultados gerados pelo modelo para a estação Santo Antônio pode ser considerada razoável enquanto que para a estação Maria Ortiz ruim, conforme é apresentada na Tabela 9 os valores do erro médio da magnitude da velocidade para as estações monitorada.

Tabela 9: Erro médio da magnitude da velocidade para as estações monitoradas.

Estação	RMAE
Santo Antônio	0,4
Maria Ortiz	1,19

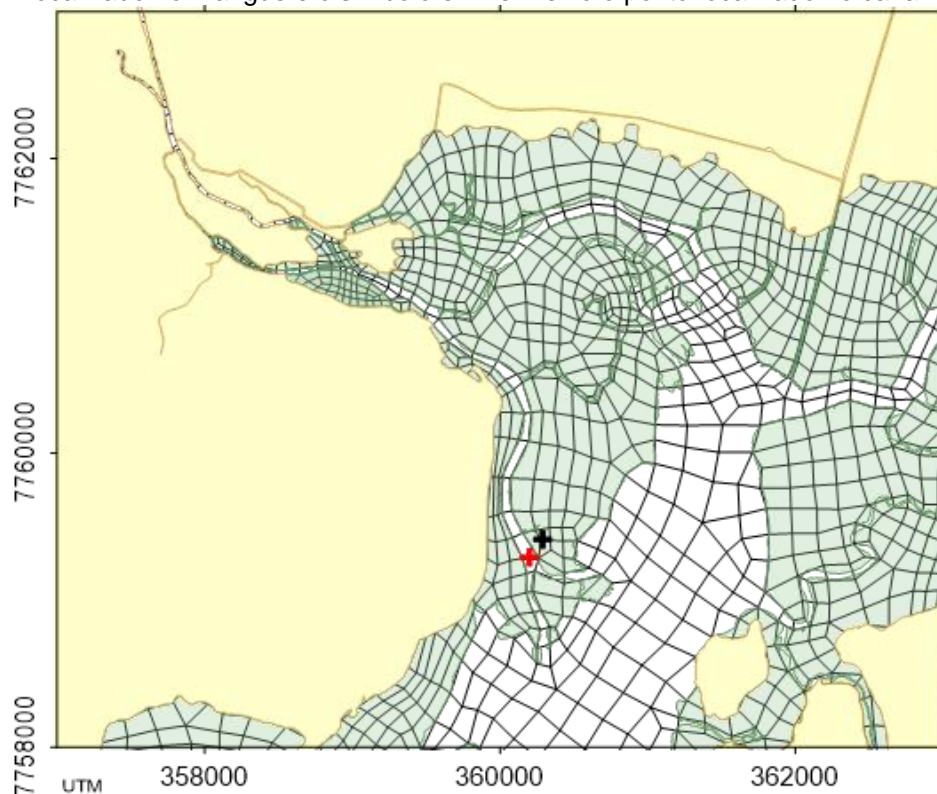
Fonte: Elaborado pela autora.

6.2 AVALIAÇÃO DA SIMULAÇÃO DAS ÁREAS ALAGÁVEIS NO CONTROLE DA SEDIMENTAÇÃO

Para avaliar a habilidade do código implementado no modelo SisBaHia[®] para a simulação das áreas alagáveis presentes nos entornos da Baía de Vitória,

foram confrontadas a magnitude da velocidade e a tensão de cisalhamento em um ponto localizado no canal e outro ponto no mangue, conforme ilustrada na Figura 28.

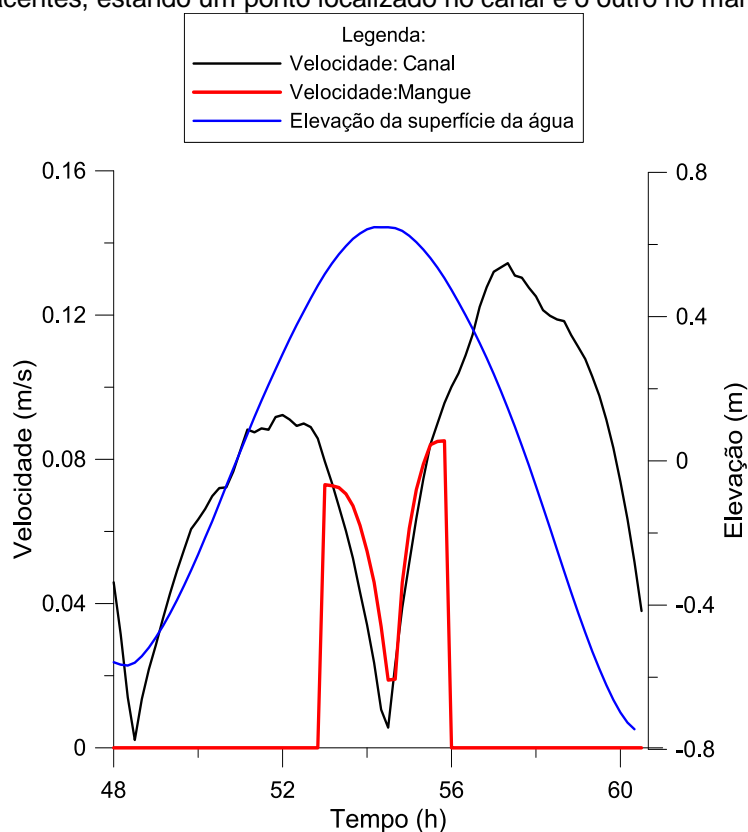
Figura 28: Localização dos pontos analisados. O símbolo em preto representa o ponto localizado no mangue e o símbolo em vermelho o ponto localizado no canal.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na avaliação da velocidade do escoamento entre os pontos analisados, conforme mostra a Figura 29, nota-se na maior parte do ciclo da maré a menor magnitude da velocidade na região correspondente ao mangue, quando comparada ao do canal, o que de acordo com Le Hir *et al.* (2000) esse comportamento indicia essas áreas alagáveis a serem de acumulação.

Figura 29: Comparação da magnitude da velocidade para o período de sizígia em dois pontos adjacentes, estando um ponto localizado no canal e o outro no mangue.



Fonte: Elaborado pela autora.

Dessa forma, ao analisar a influência das áreas alagáveis presente no entorno dos canais do estuário do Rio Santa Maria da Vitória, observa-se que essas áreas apresentam um forte controle no escoamento e consequentemente na sedimentação primária das partículas que ali alcançam quando essas áreas são inundadas. Esses resultados corroboram com os estudos apresentados por Temmamen *et al.* (2005), quando foram avaliadas a influência das áreas alagáveis em um riacho de maré no estuário de Scheldt na Holanda.

6.3 DISTRIBUIÇÃO DE SEDIMENTOS SUSPENSOS NA BAÍA DE VITÓRIA

A intenção de avaliar as zonas de sedimentação primária dos sólidos suspensos considerando diferentes posições das fontes foi verificar as regiões de acúmulo desses sedimentos ao longo do estuário, bem como avaliar a influência das áreas alagáveis no transporte desse material.

Dessa forma, esse tipo de análise possibilita a compreensão da proveniência da composição do fundo da baía, indicando as prováveis regiões de sedimentação primária em que as principais classes compostas no material suspensos provenientes do principal tributário do sistema tendem a sedimentar. Assim, o presente trabalho poderá servir de auxílio para futuros trabalhos de análise de compostos (nutrientes, contaminantes, matéria orgânica, entre outros) carregados adsorvidos a esses sedimentos.

6.3.1 Período de cheia (fevereiro de 2013)

A zona de sedimentação primária da classe silte ao longo de todo o período de cheia simulado a partir da fonte 1 e da fonte 2 são apresentadas na Figura 30 e na Figura 31, respectivamente. Na avaliação do transporte dos sedimentos entre os cenários das fontes, nota-se a sensibilidade da mobilização da posição da fonte na distribuição sedimentar ao longo do estuário. Assim, quando a fonte é posicionada a montante do curso principal do Rio Santa Maria da Vitória (fonte 1), grande parte do sedimento é retido nas planícies de maré e nos canais adjacentes a esse canal principal. No entanto, quando a fonte é fragmentada e posicionada a jusante dessas áreas alagáveis (fonte 2) verifica-se que a maior parte da massa dos sedimentos suspensos sedimentada é distribuída na zona interna do canal principal.

Corroborando aos resultados apresentados no campo de magnitude das correntes residuais (25) as planícies de maré tendem a ser zonas de baixa e/ou nula magnitude resultante entre essas correntes, contrário ao comportamento observado pelas regiões centrais dos canais.

Comportamento similar é observado na distribuição da classe areia muito fina presente nesse material suspenso, confirmando a sensibilidade do posicionamento da fonte na sedimentação primária do material sedimentar suspenso provenientes do Rio Santa Maria da Vitória. Na Figura 32 e na Figura 33 estão apresentadas as distribuições da massa sedimenta para a classe areia muito fina ao longo de todo o período de cheia simulado a partir da fonte 1 e da fonte 2, respectivamente.

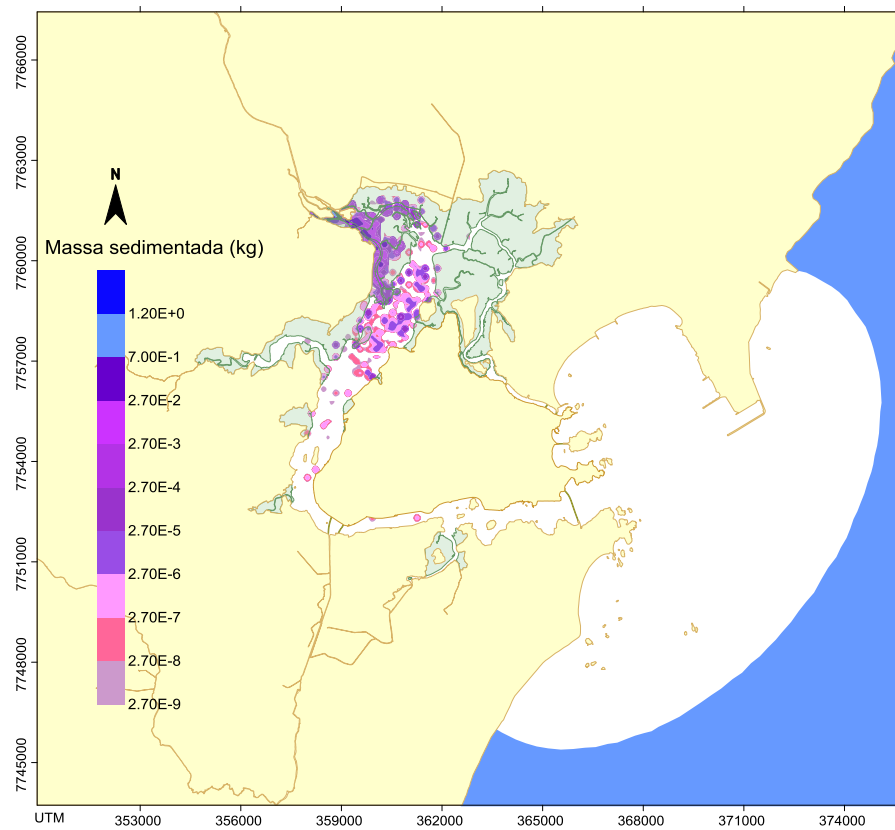
Desta forma, percebe-se que a análise do transporte de sedimentos suspensos considerando diferentes posições de lançamento dos sedimentos suspensos demonstra o controle das áreas alagáveis presentes no entorno do estuário sobre a sedimentação primária das partículas que ali alcançam durante eventos de inundação.

De acordo com a distribuição proposta por Dalrymple *et al.* (1992), confirma-se que o estuário do Rio Santa Maria da Vitória tende a despejar parcialmente os sedimentos mais finos provenientes desse principal tributário até a zona central do sistema. No entanto, a presença de extensivas planícies de maré nesse sistema é responsável por atuar no controle do transporte desses sedimentos.

De modo geral, verifica-se que o transporte do material particulado em suspensão proveniente do rio é predominante em direção ao oceano. No entanto, o material que fica retido dentro do sistema propicia a acresção da superfície das planícies alagáveis, corroborando ao comportamento da morfologia superficial das planícies de maré encontrados por Godini (2009).

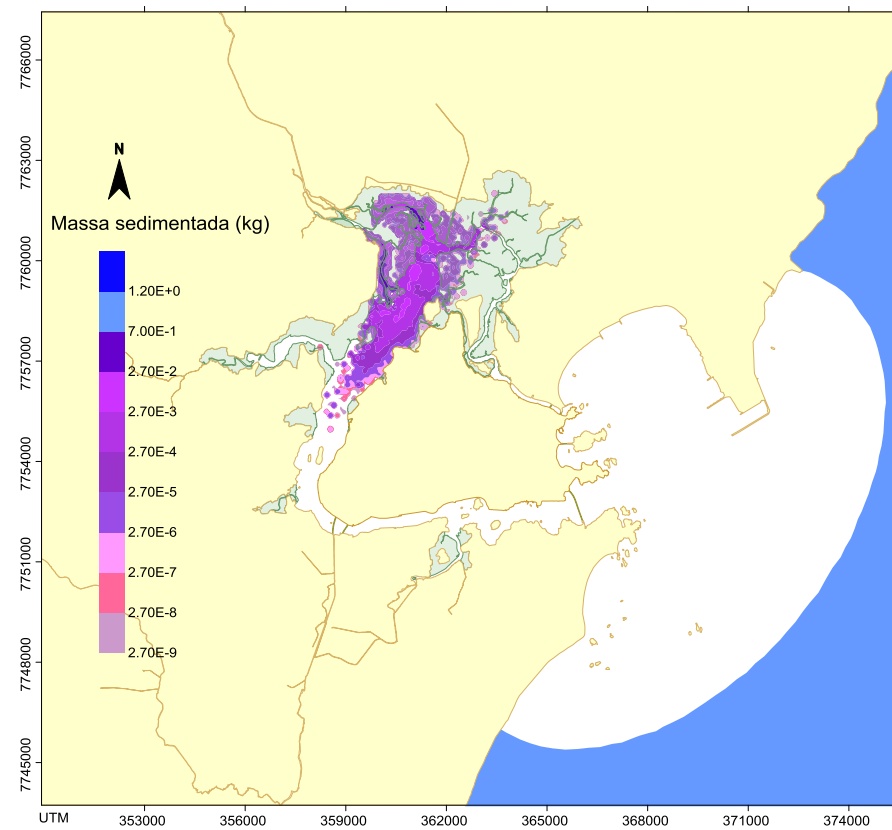
Quanto a contribuição sedimentar proveniente do Rio Santa Maria da Vitória ao longo do estuário para todo o período de cheia simulado (fevereiro de 2013), verifica-se cerca de 1.654,10 kg de massa sedimentada para a classe silte e de 58,80 kg de massa sedimentada para a classe areia muito fina, apresentando uma perda de massa pela fronteira do domínio de aproximadamente 15%.

Figura 30: Distribuição da massa sedimentada para a classe silte ao longo de todo o período de cheia simulado (fevereiro de 2013) para a fonte 1.



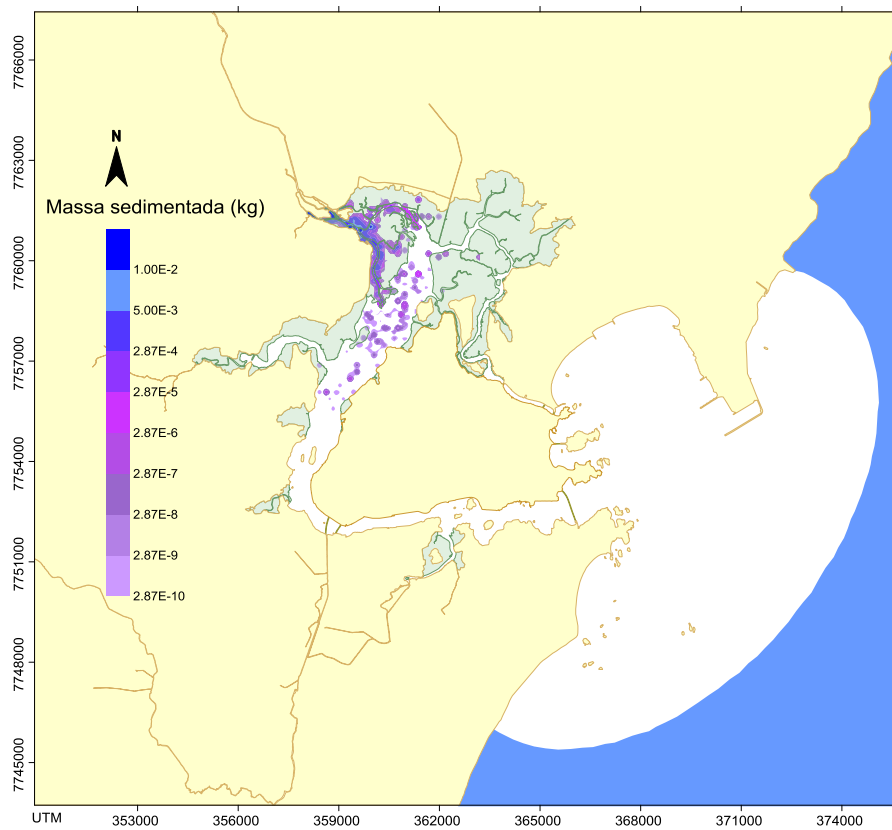
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 31: Distribuição da massa sedimentada para a classe silte ao longo de todo o período de cheia simulado (fevereiro de 2013) para a fonte 2.



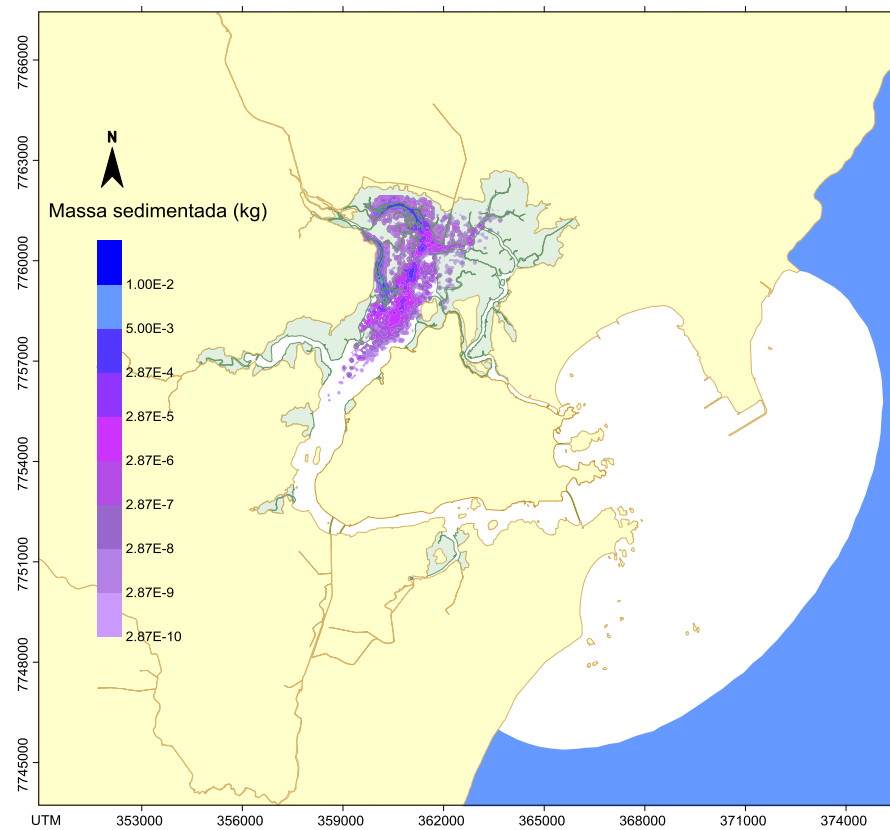
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 32: Distribuição da massa sedimentada para a classe areia muito fina ao longo de todo o período de cheia simulado (fevereiro de 2013) para a fonte 1.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 33: Distribuição da massa sedimentada para a classe areia muito fina ao longo de todo o período de cheia simulado (fevereiro de 2013) para a fonte 2.



Fonte: Elaborado pela autora.

6.3.2 Período de estiagem (agosto de 2015)

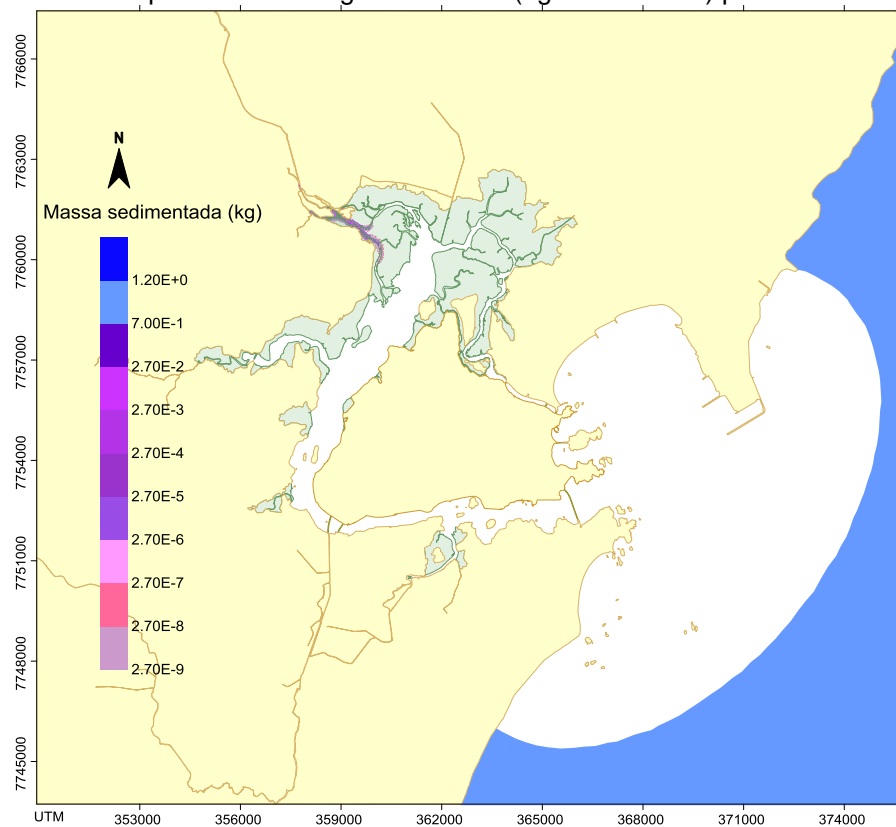
Nesse regime fica nítido a sensibilidade do posicionamento da fonte na distribuição dos sedimentos suspensos ao longo do estuário, confirmando a alta interferência das planícies de maré e dos canais adjacentes ao canal principal do Rio Santa Maria da Vitória, conforme apresentadas na Figura 34 e na Figura 35 para a classe silte ao longo de todo o período de estiagem simulado a partir da fonte 1 e da fonte 2, respectivamente.

Comportamento similar é observado na distribuição da classe areia muito fina presente nesse material suspenso ao longo de todo o período de estiagem simulado, conforme mostra a Figura 36 e na Figura 37, considerando o lançamento das partículas a partir da fonte 1 e da fonte 2, respectivamente.

Na análise desse regime, verifica-se também a influência da competência fluvial no transporte sedimentar quando o lançamento é feito a partir da fonte 1, restando todo o sedimento transportado nas proximidades dessa fonte. Entretanto, quando o lançamento das partículas se dá a partir da fonte 2, nota-se a distribuição desses sedimentos na região mais interna do canal principal do estuário, dando indícios de que a assimetria de maré (dominância de maré vazante) possa ser a responsável pelo transporte dessas partículas ao longo dessa região.

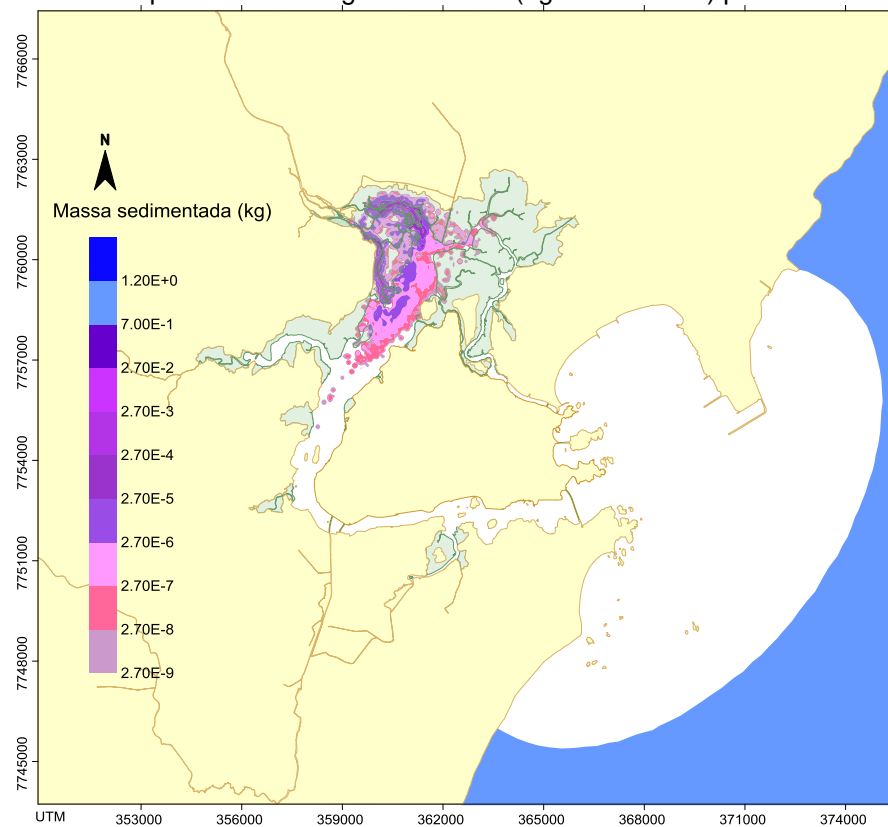
Na contribuição da massa sedimentada ao longo de todo o regime de estiagem verifica-se valores próximos a 11,17 kg por mês de massa sedimentada para a classe silte e de aproximadamente 0,3738 kg por mês para a classe areia muito fina, apresentando um percentual de perda pela fronteira de cerca de 10 %.

Figura 34: Distribuição da massa sedimentada para a classe silte ao longo de todo o período de estiagem simulado (agosto de 2015) para a fonte 1.



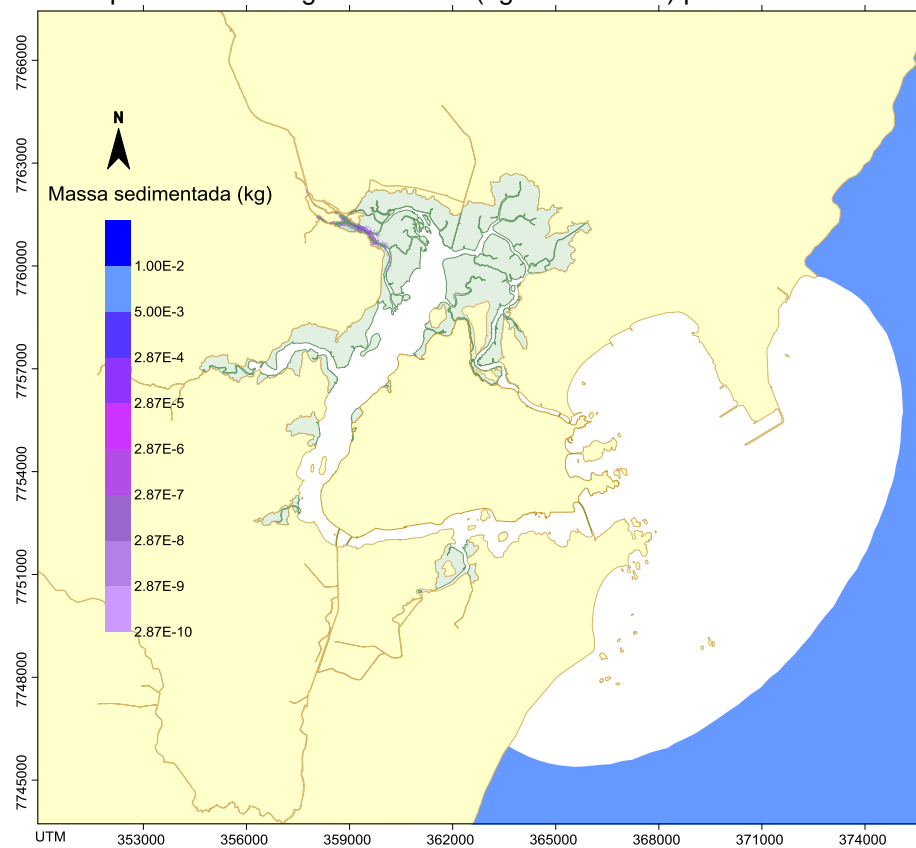
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 35: Distribuição da massa sedimentada para a classe silte ao longo de todo o período de estiagem simulado (agosto de 2015) para a fonte 2.



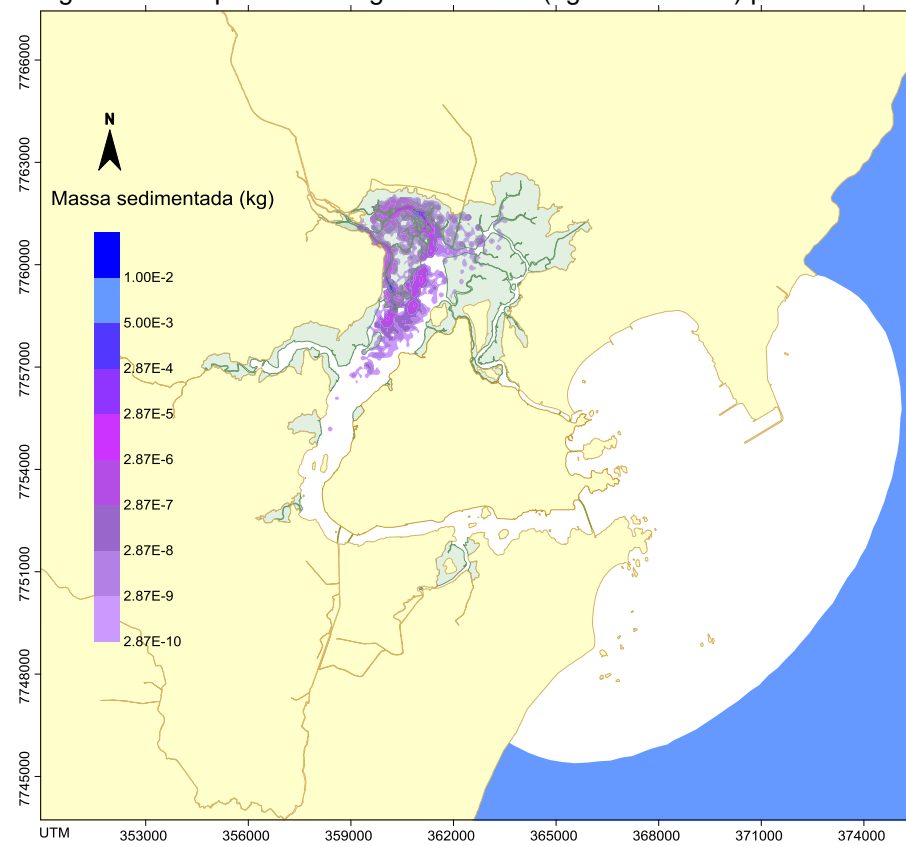
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 36: Distribuição da massa sedimentada para a classe areia ao longo de todo o período de estiagem simulado (agosto de 2015) para a fonte 1.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 37: Distribuição da massa sedimentada para a classe areia muito fina ao longo de todo o período estiagem simulado (agosto de 2015) para a fonte 2.



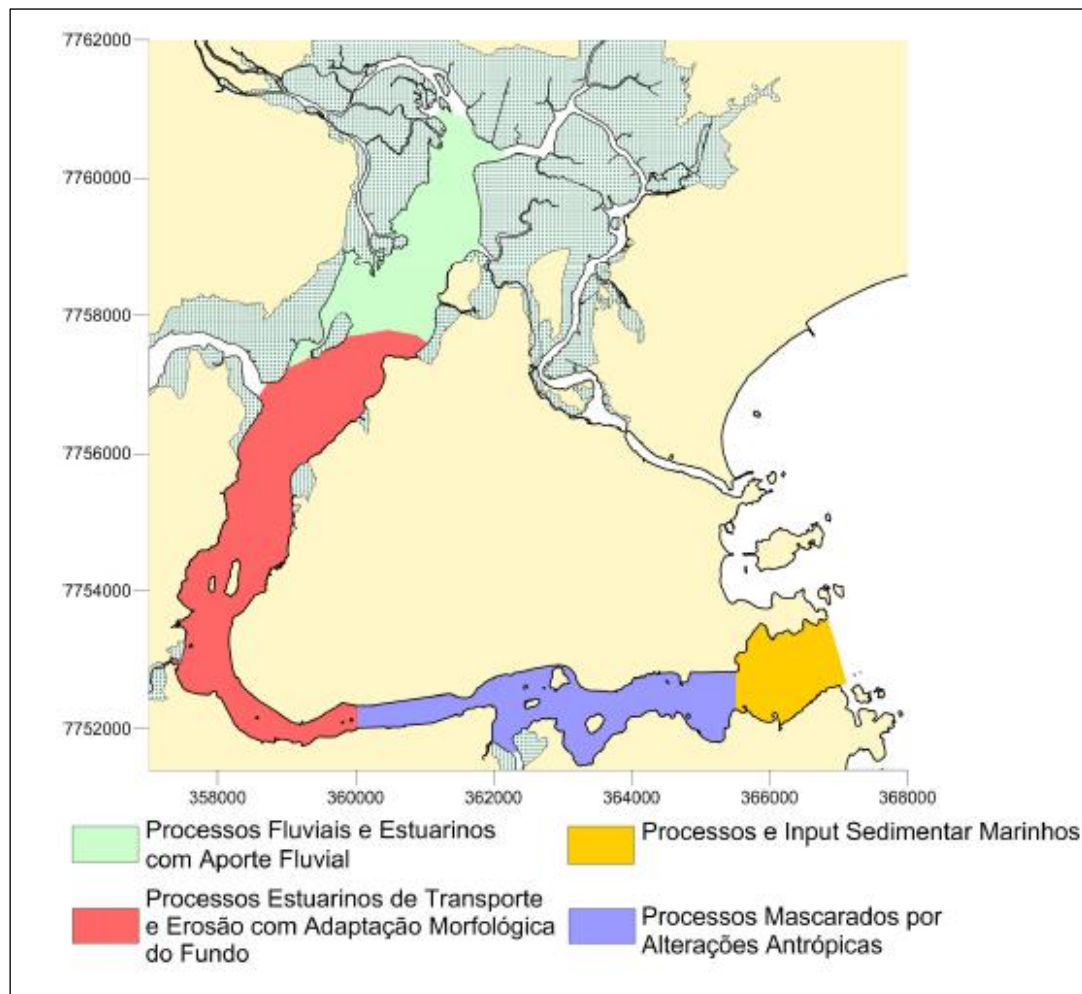
Fonte: Elaborado pela autora.

6.3.3 Análise integrada das zonas de sedimentação

As zonas de sedimentação primária das classes granulométricas predominantes no material sedimentar suspenso proveniente do Rio Santa Maria da Vitória (classe silte grosso e areia muito fina) refletem as características hidrodinâmicas do sistema estuarino. Além disso, verifica-se que o período de alta intensidade fluvial do Rio Santa Maria da Vitória tem maior capacidade de transporte da carga sedimentar suspensa do que o período de baixa, fato registrado por Dalmaschio (2008) e por Mantovanelli *et al.* (1999) para sua área de estudo.

A mobilização da fonte é sensível ao longo do estuário, apresentando influência das planícies de maré quando o lançamento dos sedimentos se dá na fonte 1, principalmente no período de baixa vazão. Dessa forma, a ausência de dados precisos para a representação das áreas alagáveis pode também inserir dúvidas e erros quanto as zonas de sedimentação primária desses sedimentos suspensos ao longo ao longo do sistema estuarino. Assim, as zonas de sedimentação primária dos sedimentos suspensos provenientes do Rio Santa Maria da Vitória podem ser corroboradas ao mapeamento de fundo apresentados por Veronez Junior *et al.* (2009), conforme ilustrada na Figura 38, confirmando que a cabeceira do estuário é dominada por areias fluviais, validando, assim, o bom emprego da metodologia adotada quando são lançadas a partir da fonte 2, ou seja, fonte com baixa interferência das áreas alagáveis presente nos entornos do canal principal do principal tributário do sistema.

Figura 38: Mapa geral dos processos sedimentares apresentados ao longo da Baía de Vitória/ES.



Fonte: Veronez Junior *et al.* (2009).

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados encontrados neste trabalho indicam a satisfatória calibração dos dados de elevação da superfície da água para todas as estações monitoradas no sistema estuarino estudado. No entanto, a calibração dos dados de corrente apresentou qualidade razoável para a estação Santo Antônio e ruim para a estação Maria Ortiz. A baixa calibração entre os dados de correntes pode estar associada, principalmente, a ausência de dados precisos para a caracterização das planícies de maré localizadas próximas a essas estações, o que pode estar inserindo erros e imprecisões também a essas.

Na avaliação do comportamento das áreas alagáveis na distribuição dos sedimentos suspensos quando essas regiões são inundadas, nota-se que os menores valores da magnitude da velocidade apresentados por essas regiões, quando comparada ao do canal adjacente, indiciam essas áreas a serem de acumulação de material.

A análise da sensibilidade do posicionamento das fontes no estuário confirma que o transporte de sedimentos suspensos está sujeito a influência das planícies de maré e dos canais adjacentes ao canal principal do Rio Santa Maria da Vitória quando a fonte de lançamento dessas partículas encontra-se na fonte 1. Esse comportamento é observado em ambos os regimes fluviais, sendo mais significativo no período de estiagem, onde a menor competência fluvial dificulta o transporte. No entanto, quando o transporte é analisado a partir da fonte 2, a sedimentação primária desse material suspenso encontra-se principalmente na zona interna do canal principal do estuário.

Os resultados da massa sedimentada detectada pelo modelo apresentam valores de 1654,10 kg por mês para a classe silte para todo o período de cheia e de 11,17 kg por mês para todo o período de estiagem. Já para a classe areia muito fina verificou-se valores de cerca de 58,83 kg por mês para todo o período de cheia e de aproximadamente 0,3738 kg por mês para todo o período de estiagem, apresentando uma perda de massa pelo sistema (modelo) implementado de cerca de 15% para o período de cheia e de aproximadamente 10 % para o período de estiagem.

Desta forma, verifica-se a boa aplicação da metodologia escolhida na análise do transporte de sedimentos suspensos do estuário da Baía de Vitória. No entanto, nota-se a importância de dados confiáveis para a representação das áreas alagáveis presente no ambiente estudado, uma vez que essas áreas interferem significativamente na distribuição sedimentar do sistema.

Recomendações:

- Recomenda-se um levantamento de dados topográficos da região do mangue mais consistentes a fim de diminuir os erros e incertezas associadas a essas regiões.
- Investir em campanhas de monitoramento da concentração de sedimentos suspenso provenientes do Rio Santa Maria da Vitória e em trabalhos da análise granulométrica que compõe esse material.
- Como continuidade deste trabalho sugere-se que seja analisada a influência das ondas e correntes costeiras no transporte e remobilização desses sedimentos fluviais depositados no leito estuarino.
- Além disso, sugere-se simular o presente trabalho por um período maior, a fim de validar a distribuição das zonas de sedimentação primária encontradas.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUCAN, J.; RIDD, P. V. Tidal asymmetry is creeks surround by saltflats and mangroves with small swamp slopes. **Wetlands Ecology and Management**, v. 8, n. 4, p. 223 – 232, 2000.

BALZANO A. Evaluation of methods for numerical simulation of wetting and drying in shallow water flow models. **Coastal Engineering**, v. 34, pp. 83-107, 1998.

BARROS, M. L. C. **Modelo de qualidade de água com alagamento e secamento aplicado a áreas alagáveis**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012

BASTOS, A. C.; QUARESMA, V. S.; DALMASCHIO, R. G.; CARMO, D. A.; SOUZA, P. M.; LIMA, B.; POZZI, F. Dinâmica Sedimentar e Morfologia de Fundo do Sistema Estuarino de Vitória, ES. **Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário**, Belém, 2007.

BATES, P. D., HORRITT, M. S. Modelling wetting and drying processes in hydraulic models. **Computational fluid dynamics: Applications in environmental hydraulics**, p. 121–146, 2005.

BRUK, S. **Methods of computing sedimentation in lakes and reservoirs**. UNESCO. Paris. 1985.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. CPRM – Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais, Rio de Janeiro, RJ, 1994.

CARVALHO, N. O. (2ª Ed). **Hidrossedimentologia prática**. CPRM – Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais, Rio de Janeiro, RJ, 2008.

CAWLEY, A., M.; HARTNETT, M. Sensitivity of a 2-dimensional hydrodynamic model to boundary conditions. **Hydraulic and Environmental Modelling: Coastal Waters**, p.157-171, 1992.

COX, T.; Maris, T.; De Vleeschauwer, P.; De Mulder, T.; Soetaert, K.; Meire, P., 2006: Flood control areas as an opportunity to restore estuarine habitat. **Ecological Engineering**, v. 28, n. 1, p. 55-63, 2006.

CHACALTANA, J. T. A.; MARQUES, A. C.; RIGO, D.; PACHECO, C. G. Influência do manguezal no padrão de escoamento do Sistema estuarino da Ilha de Vitória – ES. **V Seminário Estadual sobre Saneamento e Meio Ambiente (SESMA)**, Vitória, P. 1-7, 2003.

CSMJ. Consórcio intermunicipal das bacias dos rios Santa Maria da Vitória e Jucu. Diagnóstico e Plano Diretor das Bacias dos Rios Santa Maria da Vitória e Jucu. Volume I – Ecossistemas Aquáticos Interiores e Recursos Hídricos. Rio de Janeiro, Habtec Engenharia Sanitária e Ambiental, 1997.

DALMASCHIO, R. G; BASTOS, A. C. Aplicação do método Sonográfico para Caracterização da Distribuição Sedimentar Superficial do Fundo da Baía de Vitória – ES. In: **Anais da Jornada de Pesquisa e Iniciação Científica**, Vitória, 2008.

DALRYMPLE, R. W.; ZAITLIN, B. A.; BOYD, R. Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications: perspective. **Journal of Sedimentary Research**, v. 62, n. 6, 1992.

DOLGOPOLOVA, E. N.; ISUPOVA, M. V. Classification of estuaries by hydrodynamic processes. **Water resources**, v. 37, n. 3, p. 268-284, 2010.

DOLGOPOLOVA, E. N. Sediment transport and saltwater intrusion into the weakly stratified estuary of the Delaware R. **Water Resources**, v. 41, n. 2, p. 143-162, 2014.

DE BACKER, A.; VAN COLEN, C.; VINCX, M.; DEGRAER, S. The role of biophysical interactions within the IJzermondig tidal flat sediment dynamics. **Continental Shelf Research**, v. 30, n. 9, p. 1166-1179, 2010.

DO NASCIMENTO, T. F.; CHACALTANA, J. T. A.; PICCOLI, F. P. Análise da influência do alargamento de um estreitamento na hidrodinâmica do Canal da Passagem, Vitória-ES, através de modelagem numérica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, p. 31-39, 2013.

DYER, K. R. Estuaries: a physical introduction Wiley. **New York**, 1997.

DYER, K. R., CHRISTINE, M. C., WRIGHT, E. W. “*The Classification of Intertidal Mudflats*”, **Continental Shelf Research**, 20: 1039-1060, 2000.

DYER, Keith R. **Coastal and estuarine sediment dynamics**. John Wiley & Sons, Inc, 1986.

DRONKERS, J. Tidal asymmetry and estuarine morphology. **Netherlands Journal of Sea Research**, v. 20, n. 2, p. 117-131, 1986.

FRIEDRICHS, C. T.; AUBREY, D. G. Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries: a synthesis. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 27, n. 5, p. 521-545, 1988.

GODINHO, S. **Variação morfológica superficial de um trecho de manguezal da Baía de Vitória**. Monografia (Graduação em Oceanografia) – Curso de Oceanografia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.

GUIMARÃES, C. F. **Aplicabilidade do modelo soil and water assessment tool (SWAT) para simulação hidrológica e hidrossedimentológica em uma bacia com reservatórios – um estudo de caso da Bacia do Rio Santa Maria da Vitória – ES** Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade de Espírito Santo, Vitória, 2016. No prelo.

JOHNSON, U. K. River sediment supply, sedimentation and transport of the highly turbid sediment plume in Malindi Bay, Kenya. **Journal of Geographical Sciences**, v. 23, n. 3, p. 465-489, 2013.

LE HIR, P.; ROBERTS, W.; CAZAILLET, O.; CHRISTIE, M. BASSOULLET, P.; BACHER, C. Characterization of intertidal flat hydrodynamics. **Continental shelf research**. v.20, n. 12, p. 1433-1459, 2000.

MANTOVANELLI, A; MARONE, E.; ANGULO, R. J.; KNOPPERS, B.
Caracterização da dinâmica hídrica e do material particulado em suspensão na Baía de Paranaguá e em sua bacia de drenagem. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 51, 1999.

MAO, Q.; SHI, P.; YIN K.; GAN J., QI Y. Tides and tidal currents in Pearl River Estuary. **Continental Shelf Research**, v. 24, n. 16, p.1797-1808, 2004.

MAZDA, Y.; WOLANSKI, E.; KING, B.; SASE, A.; OHTSUKA, D.; MAGI, M.
Drag force due to vegetation in mangrove swamps, **Mangrove and Salt Marshes**, v.1, n. 3, p.193-199, 1997.

MEDEIROS, S. C.; HAGEN, S. Review of wetting and drying algorithms for numerical tidal flow models. **International Journal for numerical Methods in Fluids**. V. 71, n.4, p. 1097-0363, 2012.

MIRANDA, L. B., CASTRO, B. M., KJERFVE, B. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**. Vol. 42. Editoria da Universidade da São Paulo (Edusp), 2002.

NICHOLS, M. M.; BIGGS, R. B. Sediment accumulation rates and relative sea-level rise in lagoons. **Marine Geology**, v. 88, n. 3-4, p. 201-219, 1985.

NICHOLS, W. F.; KILLINGBECK, K. T.; AUGUST, P. V. The influence of geomorphological heterogeneity on biodiversity II. A landscape perspective. **Conservation Biology**, v. 12, n. 2, p. 371-379, 1998.

PERILLO, Ge. M. E. Tidal circulation pattern on a tidal flat, Minas Basin, Canada. **Marine geology**, v. 112, n. 1-4, p. 219-236, 1993.

PERILLO G. M. E. **Geomorphology and sedimentology of estuaries**. Elsevier, Amsterdam. 471 p, 1995.

PERILLO, G. M; SYVITSKI, J P. M. Mechanisms of sediment retention in estuaries. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 87, n. 2, p. 175-176, 2010.

PROJETO RADAMBRASIL. **Levantamento de Recursos Naturais (vols. 1–23)**. Ministério de Minas e Energia, Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), Rio de Janeiro, Brasil, 1983.

RAMPINELLI, F. G. **Correlação de sedimentos e eventos chuvosos em um trecho do Rio Santa Maria da Vitória, ES**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade de Espírito Santo, Vitória, 2013.

RIGO, D. **Análise do escoamento em regiões estuarinas com manguezais – medições e modelagem na Baía de Vitória, ES**. Tese (Doutorado em Ciências em engenharia oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

RIGO, D.; SARMENTO, R. **Determinação do Tombo da Maré no Canal da Passagem - Relatório Final**, Laboratório de Hidráulica, UFES, Vitória, Brasil, 1993.

ROCHA, A. B. **Avaliação Correlativa entre Hidrodinâmica e Qualidade de água para a Baía do Espírito Santo**. Dissertação de mestrado em Engenharia Ambiental – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2000.

ROSMAN, P. C. C. Referência técnica do SisBAHIA, Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental. **Rio de Janeiro: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia**, 2014.

ROSE, C. P.; THORNER, P. D. Measurements of suspended sediment transport parameters in a tiday estuary. **Continental Shelf Research**. v. 21, n. 15, p. 1551-1575, 2001.

SANTOS, M. M. **Aplicação da Modelagem Estocástica no Estudo de Riscos ao Abastecimento de Água da Grande Vitória**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 1994.

SCHETTINI, C. A. F. Near bed sediment transport in the itajaí-açu river estuary, southern brazil. **Proceedings in Marine Science**, v. 5, p. 499-512, 2009.

SCHOELLHAMER, D. H. Variability of suspended-sediment concentration at tidal to annual time scales in San Francisco Bay, USA. **Continental Shelf Research**, v. 22, n. 11, p. 1857-1866, 2002.

SUGUIO, K. **Geologia Sedimentar**. São Paulo: Edgard Blücher. 2003.

SWINBANKS, D. D. Intertidal exposure zones: a way to subdivide the shore. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, v. 62, n. 1, p. 69-86, 1982.

VARNELL, L. M.; EVANS, D. A.; HAVENS, K. J. A geomorphological model of intertidal cove marshes with application to wetlands management. **Ecological Engineering**, v. 19, n. 5, p. 339-347, 2003.

VAN RIJN, L. C. Sediment transport, part I: bed load transport. **Journal of hydraulic engineering**, v. 110, n. 10, p. 1431-1456, 1987.

VAN RIJN, L. C. The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models. **Coastal Engineering**, v. 47, n. 3, p. 295-327, 2003.

VERONEZ JÚNIOR, P.; BASTOS, A.C.; QUARESMA, V. S. Morfologia e distribuição sedimentar em um sistema estuarino tropical: Baía de Vitória, ES. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 27, n. 4, p. 609-624, 2009.

TEXEIRA, W.; TAIOLI, F. Decifrando a Terra. Editora Oficinas de Textos, São Paulo, Sp, 2000.

TEMMERMAN, S.; BOUMA, T. J.; GOVERS, G.; WANG, Z. B.; DE VRIES, M. B.; HERMAN, P. M. J. Impact of vegetation on flow routing and sedimentation patterns: Three-dimensional modeling for a tidal marsh. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, v. 110, n. F4, 2005.

TUCCI, C.E.M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2.ed. Porto Alegre. Ed. UFRGS, ABRH, 2001.

WANG, X. H.; W., H.. Tidal straining effect on the suspended sediment transport in the Huanghe (Yellow River) Estuary, China. **Ocean dynamics**, v. 60, n. 5, p. 1273-1283, 2010.

WANG, Y.; GAO, S.; LI, K. A preliminary study on suspended sediment concentration measurements using an ADCP mounted on a moving vessel. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, v. 18 n. 2, p. 183-189, 2001.

WILMOTT, J. C. On the validation of models. **Physical Geography**. v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981.

WOLANSKI, E., MAZDA, Y., KING, B. & GAY, S. Dynamics, flushing and trapping in Hinchinbrook Channel, a giant mangrove swamp, Australia. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 31, n. 5, p. 555-579, 1990.

WOLANSKI, E. Transport of sediment in mangrove swamps. **Hydrobiologia**, v. 295, n. 1-3, p. 31-42, 1995.

XU, J. X.; CHENG, D. S. Relation between the erosion and sedimentation zones in the Yellow River, China. **Geomorphology**, v.48, n.4, p. 365-382, 2002.